



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

GRAU EN ARQUITECTURA TÈCNICA I EDIFICACIÓ **TREBALL DE FI DE GRAU**

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL EFECTO DE LA RELACIÓN ÁRIDO/CEMENTO EN LOS MORTEROS USANDO HORMIGÓN RECICLADO

Projectista: Jessica Magtibay Abarcar

Director/s: Dr. José Manuel Gómez Soberón

M. C. Fca. Guadalupe Cabrera Covarrubias

Convocatòria: Gener/Febrer 2016



La obra se distribuye bajo los términos y condiciones de la presente licencia pública de **Creative Commons** ("ccpl" o "licencia"). La obra está protegida por la ley del derecho de autor y/o por cualquier otra ley que resulte aplicable. Cualquier uso distinto del autorizado por la presente licencia o por la ley del derecho de autor está prohibido.

Se entiende que por el mero ejercicio de cualquiera de los derechos aquí previstos sobre la obra, usted acepta y se obliga bajo los términos y condiciones de la presente licencia. El licenciente le otorga los derechos aquí descritos considerando la aceptación por su parte de dichos términos y condiciones.

RESUMEN

En el Trabajo de Final de Grado (TFG) en Arquitectura Técnica y Edificación que se muestra a continuación presenta un análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros con agregado de hormigón reciclado –proveniente de los residuos de la construcción– comparándolos con los morteros convencionales de áridos naturales, tanto en estado fresco como en endurecido hasta los 90 días.

Los morteros se fabrican con diferentes porcentajes de sustitución (10, 20, 30, 50 y 100%) y dos tipos de relación árido/cemento para comparar los comportamientos de éstos con los del mortero de árido natural; y así poder escoger cuál es la proporción de sustitución óptima para obtener el máximo de prestaciones comunes a un mortero convencional.

El trabajo de laboratorio es una de las piezas clave de este TFG; se necesita la preparación de los ensayos con su respectiva normativa y una correcta planificación del calendario. Para conseguir unos resultados fiables, se precisa de pulcritud a la hora de realizar los ensayos y una coherencia con los valores obtenidos.

Con la elaboración de los morteros y los ensayos acabados, se procede a analizar los resultados del mortero en estado fresco –contenido de agua, la densidad y el contenido de aire–, y de los morteros endurecidos –resistencia a compresión y flexión, módulos elásticos estáticos y dinámicos, retracción por secado y la densidad aparente–. Estos resultados se contrastan y discuten con las publicaciones de diversos autores para así verificar o discrepar sus afirmaciones.

Los resultados generales obtenidos indican que morteros con reemplazo de hasta el 20% de árido reciclado de hormigón, presentan comportamientos similares al mortero convencional de árido natural; pudiendo ser factible su uso en aplicaciones en el sector de la construcción.

ABSTRACT

In this Final Grade Work (FGW) in Technical Architecture and Building shown below presents an analysis of the physical and mechanical properties of mortars with recycled aggregate concrete –from the construction waste– compared with conventional mortars with natural aggregates, both in fresh and hard phase up to 90 days.

These mortars are made of different percentages of replacement and two types of aggregate/cement ratio to compare the behavior of these with conventional mortar with natural aggregates; then can be choose the optimal replacement ratio for maximum common benefits to a conventional mortar.

The Laboratory work is one of the key of these FGW, the preparation of these tests with their respective rules and proper planning calendar is required. To achieve reliable results, neatness is necessary when performing the test and consistency with the values obtained.

When the mortars are produced and testing is finished, it proceed to analyze the results of the mortar in fresh phase –water content, density and air content– and hardened phase –compressive and flexural strength, static and dynamic modulus of elasticity, drying shrinkage and bulk density–. These results are contrasted and discussed with publications of different authors, so it could be verified or disagree to their claims.

The overall results indicate that replacement mortars up to 20% recycled aggregate concrete, present similar behavior to conventional mortar; use in applications in the construction industry may be feasible.

RESUM

En el Treball Fi de Grau (TFG) en Arquitectura Tècnica i Edificació que es mostra a continuació presenta un anàlisi de les propietats físiques i mecàniques dels morters amb agregats de formigó reciclat –provinents dels residus de la construcció– comparant-los amb els morters convencionals d'àrids naturals, tant en estat fresc com endurit fins als 90 dies.

Els morters es fabriquen amb diferents percentatges de substitució i dos tipus de relació àrid/ciment per comparar els comportaments d'aquests amb els del morter d'àrid natural; i així poder escollir quina és la proporció de substitució òptima per obtenir el màxim de prestacions comunes a un morter convencional.

El treball de laboratori es una de las peces clau d'aquest TFG; es necessita la preparació dels assaigs amb la seva respectiva normativa i una correcta planificació del calendari. Per aconseguir uns resultats fiables, es precisa de pulcritud a l'hora de realitzar els assaigs i una coherència amb els valors obtinguts.

Amb la elaboració dels morters i els assaigs acabats, es procedeix a analitzar els resultats del morter en estat fresc –contingut de agua, la densitat y el contingut d'aire– i dels morters endurits –resistència a compressió i flexió, mòduls elàstics estàtics i dinàmics, retracció de secar i la densitat aparent–. Aquests resultats es contrasten i discuteixen amb les publicacions de diversos autors per així verificar o discrepar les seves afirmacions.

Els resultats generals obtinguts indiquen que morters amb reemplaçament de fins el 20% d'àrid reciclat de formigó, presenten comportaments similars al morter convencional d'àrid natural; podent ser factible el seu ús en aplicacions en el sector de la construcció.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	7
CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE.....	17
1.1 ÁRIDOS RECICLADOS Y SU SUSTITUCIÓN.....	18
1.2 MATERIALES Y DOSIFICACIÓN	19
1.3 ENSAYOS DEL MORTERO.....	20
1.3.1 ENSAYOS EN FRESCO	20
1.3.2 ENSAYOS EN ENDURECIDO	21
CAPÍTULO II. MORTERO, MATERIALES Y MEZCLAS.....	22
2.1 EL MORTERO	25
2.2 ORIGEN DE LOS MATERIALES	25
2.2.1 ÁRIDOS	25
2.2.2 CONGLOMERANTE. CEMENTO.....	30
2.2.3 AGUA DE AMASADO	31
2.3 DOSIFICACIÓN	31
2.3.1 PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS Y PROBETAS.....	33
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA. PROCESO EXPERIMENTAL.....	37
3.1 ENSAYO DEL MORTERO FRESCO	37
3.1.1 CONSISTENCIA	37
3.1.2 DENSIDAD DEL MORTERO FRESCO.....	39
3.1.3 CONTENIDO DE AIRE OCLUIDO.....	39
3.2 ENSAYOS DEL MORTERO ENDURECIDO	40
3.2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN	41
3.2.2 RESISTENCIA A FLEXIÓN	43
3.2.3 MÓDULO ELÁSTICO ESTÁTICO	44
3.2.4 MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO MEDIANTE LA FRECUENCIA DE ONDAS SONORAS.....	44
3.2.5 MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO MEDIANTE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS.....	45
3.2.6 RETRACCIÓN POR SECADO	46
3.2.7 DENSIDAD APARENTE Y ABSORCIÓN. ÍNDICE DE POROSIDAD ABIERTA.....	47

CAPÍTULO IV. EXPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1 ENSAYOS DEL MORTERO FRESCO	49
4.1.1 ANÁLISIS DE LA CONTENIDO DE AGUA FINAL DE LAS MEZCLAS	49
4.1.2 ANÁLISIS DE LA DENSIDAD	51
4.1.3 ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE AIRE OCLUÍDO	52
4.1.4 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD Y EL CONTENIDO DEL AIRE.....	53
4.2 ENSAYOS DEL MORTERO ENDURECIDO	55
4.2.1 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN	55
4.2.2 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN	58
4.2.3 ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO ESTÁTICO	60
4.2.4 ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO MEDIANTE LA FRECUENCIA DE ONDAS SONORAS	61
4.2.5 ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO MEDIANTE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS	64
4.2.6 ANÁLISIS DE LA RETRACCIÓN POR SECADO	66
4.2.7 ANÁLISIS DE LA DENSIDAD POR ABSORCIÓN. ÍNDICE DE POROSIDAD Y ABSORCIÓN	68
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	71
5.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	71
5.2 CONCLUSIONES PERSONALES	72
BIBLIOGRAFÍA, REFERENCIAS WEB Y TRABAJOS CITADOS.....	73
AGRADECIMIENTOS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Granulometría de la arena natural.....	28
Figura 2. Granulometría del árido de hormigón reciclado AHR	29
Figura 3. Cantidades de agua teóricos y finales de las mezclas	49
Figura 4. Densidades de las mezclas	51
Figura 5. Resultados del contenido de aire de las mezclas	52
Figura 6. Relación entre el contenido de aire y la densidad en estado fresco	54
Figura 7. Resultados del ensayo a compresión de las probetas $a/c = 3,25$ en MPa....	55
Figura 8. Resultados del ensayo a compresión de las probetas $a/c = 4,75$ en MPa....	56
Figura 9. Resultados del ensayo a flexión de las probetas $a/c = 3,25$ en MPa	58
Figura 10. Resultados del ensayo a flexión de las probetas $a/c = 4,75$ en MPa	59
Figura 11. Resultados del MOE_E de las probetas MHR-I y MHR-II en función de la deformación a los 90 días en MPa.....	60
Figura 12. Resultados del promedio de las caras 1 y 2 de MOE_D por flexión para propagación del sonido de $a/c = 3,25$ en GPa.....	61
Figura 13. Resultados del promedio de las caras 1 y 2 de MOE_D por flexión para propagación del sonido de $a/c = 4,75$ en GPa.....	62
Figura 14. Resultados de MOE_D para propagación del sonido de la cara longitudinal de $a/c: 1/3,25$ en GPa.....	63
Figura 15. Resultados de MOE_D para propagación del sonido de la cara longitudinal de $a/c: 1/4,75$ en GPa.....	63
Figura 16. Resultados de MOE_D por flexión para la propagación del ultrasonido de la cara longitudinal de $a/c = 3,25$ en GPa.....	64
Figura 17. Resultados de MOE_D por flexión para la propagación del ultrasonido de la cara longitudinal de $a/c = 4,75$ en GPa.....	65
Figura 18. Resultados de la retracción por secado de las probetas de relación $a/c = 3,25$	66
Figura 19. Resultados de la retracción por secado de las probetas de relación $a/c = 4,75$	67

Figura 20. Resultados de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de las probetas de relación $a/c = 3,25$ a 28 días de curación..... 68

Figura 21. Resultados de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de las probetas de relación $a/c = 4,75$ a 28 días de curación..... 69

Figura 22. Resultados de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de las probetas de relación $a/c = 3,25$ a 60 días de curación..... 69

Figura 23. Resultados de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de las probetas de relación $a/c = 4,75$ a 60 días de curación..... 70

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tamizado con las mallas No. 4 y 30 de la ASTM	26
Ilustración 2. Comparación de los áridos tamizados	27
Ilustración 3. Saco de 25 kg de cemento Portland UNILAND CEM I 42,5 N-SR 5 usado en las mezclas	30
Ilustración 4. Material inicial usado para la realización de las mezclas	33
Ilustración 5. Máquina mezcladora con dos velocidades	34
Ilustración 6. Molde metálico desmontable de 4 x 4 x 16 cm	35
Ilustración 7. Molde de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm con pernos en los extremos para los ensayos de retracción	35
Ilustración 8. Máquina para el vibrado de las probetas	36
Ilustración 9. Contenedor lleno de agua para sumergir las probetas para la curación dentro de la cámara húmeda	36
Ilustración 10. Arreglo experimental para consistencia: a) Mesa de sacudidas, b) Molde normalizado y c) Pisón.	37
Ilustración 11. Medición del diámetro resultante para el ensayo de consistencia	38
Ilustración 12. Molde de 1L de capacidad y balanza de tara 4.000 g y 0,01 g de precisión	39
Ilustración 13. Instrumental para el ensayo de contenido de aire de 1L de capacidad	40
Ilustración 14. Recogida de datos de las medidas de las probetas 4 x 4 x 16 cm	41
Ilustración 15. Probetas de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm para los ensayos de retracción.....	41
Ilustración 16. Realización del ensayo a compresión de la probeta 4 x 4 x 16 cm a 1,8 mm/min	42
Ilustración 17. Ejemplo del gráfico de los datos que el programa informático recoge durante el ensayo de la resistencia a compresión.....	43
Ilustración 18. Realización del ensayo a flexión de la probeta 4 x 4 x 16 cm a 0,7 mm/min	43
Ilustración 19. Ejemplo del gráfico de los datos que el programa informático recoge durante el ensayo de la resistencia a flexión.....	44

Ilustración 20. Muestra de la recogida de datos del ensayo mediante la frecuencia de ondas sonoras	45
Ilustración 21. Muestra de la recogida de datos para el ensayo de propagación de los ultrasonidos con el C372N de Matest	46
Ilustración 22. Toma de datos de la referencia para la retracción para establecer la lectura inicial	46
Ilustración 23. Toma de datos de la retracción de una probeta sin parafina (a) y una sellada con parafina (b)	47
Ilustración 24. Recipiente de vacío para el ensayo de porosidad de las probetas	48
Ilustración 25. Obtención de la masa sumergida en agua de una probeta	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cálculo del volumen estimativo de los residuos producidos en obra por cada m ²	15
Tabla 2. Propiedades físicas AN.....	27
Tabla 3. Composición y características del AHR.....	28
Tabla 4. Propiedades físicas del AHR	29
Tabla 5. Características del cemento CEM I 42,5 N/SR	30
Tabla 6. Características del agua de Barcelona del año 2014.....	31
Tabla 7. Nomenclatura de las mezclas según el porcentaje de AHR de sustitución....	31
Tabla 8. Dosificación de la mezcla de relación a/c = 3,25 para una probeta de 4 x 4 x 16 cm con la cantidad de agua teórica. Cantidades en gramos	32
Tabla 9. Dosificación de la mezcla de relación a/c = 3,25 para una probeta de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm con la cantidad de agua teórica. Cantidades en gramos	32
Tabla 10. Dosificación de la mezcla de relación a/c = 4,75 para una probeta de 4 x 4 x 16 cm con la cantidad de agua teórica. Cantidades en gramos	32
<i>Tabla 11. Dosificación de la mezcla de relación a/c = 4,75 para una probeta de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm con la cantidad de agua teórica. Cantidades en gramos</i>	<i>33</i>
Tabla 12. Normativa usada para los ensayos del mortero fresco	37
Tabla 13. Normativa usada para los ensayos del mortero endurecido.....	40

GLOSARIO

Las nomenclaturas utilizarán en este trabajo son las siguientes:

a/c:	Relación árido/cemento.
AHR:	Árido de Hormigón Reciclado.
AN:	Árido Natural.
ASTM:	American Society for Testing and Materials.
MHR:	Mortero con árido de Hormigón Reciclado.
MHR-I:	Morteros con porcentaje de AHR con relación a/c = 3,25
MHR-II:	Morteros con porcentaje de AHR con relación a/c = 4,75
MOE _E :	Módulo Elástico Estático.
MOE _D :	Módulo Elástico Dinámico.
N3,25/N4,75:	Muestra de referencia con el árido totalmente natural.
OD:	Material desecado
RCD:	Residuos de la Construcción y Demolición
SSD:	Material Saturado Superficialmente seco
UNE EN:	Una Norma Española European Norm
UNE EN ISO:	Una Norma Española European Norm International Standard Organization
w/c:	Relación agua/cemento

INTRODUCCIÓN

En los años de estudios del grado nos han enseñado a construir (materiales, sistemas constructivos, estructuras, planificación de obras, viabilidad de promociones, etc.) y el mantenimiento de las edificaciones, pero no se han hablado de los residuos que se producen durante la construcción, ya sea *in situ* o de los elementos prefabricados, así como de igual forma de las demoliciones. Caso excepcional que de forma somera si se ha tratado en algunas asignaturas como las del DAC de Impacto Ambiental y Rehabilitación Energética.

El problema de la gestión de los residuos derivados de la construcción y demolición es muy evidente, tanto que diferentes autores [1]–[3] han mostrado su preocupación. Con el actual volumen de construido, la tímida reactivación de la nueva construcción y la rehabilitación de los edificios existentes, no se puede evitar la generación y producción de los dichos residuos en la construcción. Por tanto, es aquí que urge la necesidad de una buena normalización y legislación para fomentar su uso [2], [4], [5], mediante el reciclaje y la reutilización [1], [2] que hacen factible bajar el impacto ambiental y también reducir el uso de materia de primera generación .

En España se cuenta con el Real Decreto 105/2008 que regula la producción y gestión de los residuos gestados en la construcción y demolición con una política de gestión de los áridos reciclados en su aplicación, por ejemplo en el hormigón; dando como origen en el año 2014 la creación de la Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición. Éstos, han realizado una estimación de los residuos producidos en base a los metros cuadrados (m^2) construidos de obra. En la siguiente Tabla 1, se presenta su estimación para diferentes tipologías constructivas:

Tabla 1. Cálculo del volumen estimativo de los residuos producidos en obra por cada m^2

Tipología de obra		Ratio m^3/m^2 RCD Total
1	Infraestructuras de carreteras	1,56
2	Obras de reforma o rehabilitación	0,57
3	Construcción de obra de nueva edificación	0,14
4	Demolición completa de obra de fábrica	0,74
5	Demolición completa de estructura de hormigón	1,22
6	Demolición de naves industriales estructura metal	1,26
7	Demolición de naves industriales estructura hormigón	1,19

Fuente: Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición

Para poder tener una idea de la magnitud de los residuos de la construcción producidos en nuestro país, se tienen unos datos facilitados por la Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (GERD) [6].

En la cual se indica que en el año 2008 la producción de residuos de construcción y demolición (RCD) fue estimada en unos 35 millones de toneladas y que solamente un 15% (aproximadamente) fue reciclado y transformado en materiales secundarios para la construcción [6].

En el ámbito español, casi la totalidad de los áridos de hormigón reciclado (AHR) que se producen no es únicamente hormigón. Normalmente están formados por materiales mixtos que, en proporciones variables, en resumen, se pueden citar los siguientes [6]:

- Hormigón triturado y mortero
- Piedra sin mortero adherido
- Materiales cerámicos y de obra de fábrica
- Asfalto
- Otros materiales impropios (plásticos, madera, vidrio, etc.)

Como queda patente, las perspectivas de generación de residuos de la construcción y de otros sectores, no solo es importante, si no que se prevé que se incrementará en un futuro reciente; siendo por ello, que en este trabajo se proponga buscar una aplicación de alguno de estos residuos, mediante un análisis comparativo de los datos del comportamiento del mortero de cemento sin aditivos, fresco (consistencia, densidad y contenido de aire) y también endurecido (resistencia a compresión y flexión, módulos elásticos, retracción y densidad aparente), de distintas relaciones a/c (3,25 y 4,75) con el uso de áridos procedentes del hormigón reciclado como sustituto del árido natural. En este trabajo se proponen usar diferentes porcentajes de sustitución 10, 20, 30, 50, y 100%, para poder comparar con el mortero tradicional con áridos naturales; de igual forma, se prevén –en algunos ensayos– la realización de probetas testigo de referencia con la misma relación a/c pero con el 0% de árido de hormigón reciclado, que permitan calibrar y comparar los resultados. Estos resultados serán contrastados con diferentes investigaciones mediante su análisis. Pero antes de proceder a hacer los ensayos se presentaran los materiales que se usaran para hacer el mortero; además se explicará el proceso de la elaboración de las muestras en el laboratorio siguiendo las normas ASTM.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la relación de árido/cemento usando diversos porcentajes de sustitución de árido; y asimismo definir la proporción ideal para que la presencia del árido reciclado no sea causa de un uso inadecuado o no propicio del mortero a aplicar. Como resultado secundario de este trabajo, se podrá definir cuál podría ser su uso en la construcción en función de los resultados obtenidos.

CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE

La expansión de la población mundial viene influenciada por la industria de la construcción, la intensa industrialización, la aparición de las nuevas tecnologías, el crecimiento de la población y las urbanizaciones centralizadas y masificadas [7]; este desarrollo hace que se eleve exponencialmente el consumo de los recursos naturales y de energía. La construcción consume un 40% de los recursos naturales, así que es necesario la práctica de una construcción sostenible [8]. Éste no es el único problema con el medioambiente, la inmensa cantidad de residuos que se producen cada año de la construcción y demolición hace se degrade nuestro hábitat contribuyendo a agravar las inundaciones y la proliferación de causas dañinas para la salud pública ya que arrojar los residuos de la construcción en vertederos es perjudicial para el entorno [7]; esta cuestión hace replantearse como se deberían gestionar estos residuos, así que se precisan cambios legislativos impulsados por la UE [2] para paliar la escasez de materiales de la construcción como también impulsar su reciclaje y aprovechamiento [9].

La implantación del desarrollo de la sostenibilidad en el siglo XXI implica la reutilización de los productos RCD [10]; no reutilizarlos no es viable ni ventajoso económicamente para la sociedad, por eso es necesario presentar nuevas propuestas para que la reutilización de éstos sea eficaz y eficiente tanto técnica, económicamente y respetuosa con el medioambiente [2], [5]. Actualmente en Europa solamente una porción pequeña se recicla y está orientada principalmente en la construcción de carreteras, para zahorras, bases, sub bases y drenajes [4] y en determinados países también se usa la fracción gruesa del árido para la fabricación de hormigones estructurales [11]. Pero algunos autores afirman que la fracción fina de dichos áridos también es viable para el uso en morteros de albañilería [1], [2], [4], [5], [7]–[12].

La necesidad de gestionar los residuos ocasionados por las demoliciones de edificios, estructuras y construcción ha abierto camino a nuevas investigaciones sobre la reinserción de éstos como material de aportación –ya que el 75% proviene de recursos naturales [7]– en la fabricación de morteros y hormigones para la construcción [1], [13] o también la posibilidad de reciclar el lodo procedente del agua de tratamiento en construcción y demolición de plantas de reciclaje [3]. La mayoría de investigaciones se enfocan al uso de la fracción gruesa del AHR [13] (aunque éste ya tiene el uso normalizado en los hormigones) e ignoran la fracción fina; porque básicamente los finos tienen una alta porosidad que hace que se reduzcan la actuación del resto de los componentes [8] y limita el uso por las impurezas de su composición [7]. Por eso se necesita plantear otras alternativas para encontrar una solución comercial de los áridos de fracción fina, los potenciales usos de los AHR finos son los morteros de albañilería y revoco. Por otra parte, existen otros autores que afirman que los AHR también son aptos para morteros de albañilería [2], ya que no presentan propiedades inferiores a las especificadas para morteros, estructuras de hormigón [4], hormigones o incluso para elementos prefabricados [14]. A diferencia de los hormigones, los morteros no están sujetos a normativa estructural [11]; así que se ha decidido trabajar sobre el uso de estos áridos en morteros, ya que la investigación es más escasa y aún no dispone de una normativa que lo regularice.

Con tantos trabajos sobre el mismo tema, se precisa que sigan un conjunto de normas para que los resultados de los ensayos se puedan verificar y a la vez tengan puntos en común para poder compararse entre ellos. En general, la mayoría de investigaciones son de carácter internacional, así que se rigen por la misma normativa que este trabajo, las normas ASTM o en su defecto, normativas nacionales o continentales correspondientes adaptadas en cada lugar.

1.1 ÁRIDOS RECICLADOS Y SU SUSTITUCIÓN

No todos los residuos son iguales; en la construcción, se usan muchos tipos de materiales como los de origen cerámico, los vidrios, metálicos, etc. Pero un material del que hay grandes cantidades de residuos –de producción de prefabricados, construcción *in situ* y demolición– es el que tiene como origen el hormigón, ya que la gran mayoría de las construcciones actuales son de estructura de hormigón armado.

En la normativa EHE-08, aparece un anexo que habla sobre los áridos reciclados, pero en este caso es para la producción de hormigones y solo se acepta la fracción gruesa de los mismos. La fracción fina de los residuos de RCD están compuestos por materiales diversos, esencialmente formados por mortero y pasta de cemento dura que necesita tal cantidad de agua que se hace difícil reaprovecharlos [12]; así que en las investigaciones de Hincapié et al. [14] y Braga et al. [7] las partículas inferiores a 0,075 mm quedan descartadas para la fabricación de sus mortero. Pero también hay autores que manifiestan que los AHR son tan fiables como los áridos naturales [13].

Los áridos reciclados pueden tener distintos orígenes, como por ejemplo residuos de demoliciones, rechazos de prefabricados de hormigón, o de probetas de hormigón realizadas para hacer los experimentos y control de producción [14], etc. De forma particular, la arena reciclada y por lo que respecta al origen de ellas, no siempre se especifica su origen; pero autores como Cabrera et al. [9] indican que el producto usado proviene de los escombros de demolición de una edificación de sistema constructivo de viga y losa de los años 30; además especifica que no se requirió triturar el material ya que las condiciones dadas eran las idóneas para usarlo como arena. En otra investigación se explica que el material que se usa proviene de una plataforma de reciclado de Amiens, Francia [12]. Y en la investigación de Neno et al. [8] también se indica que provienen de bloques de hormigón machacados.

El origen de los áridos naturales es de especial interés también, ya que nos sirven como comparativa a los datos extraídos de las pruebas. Por ejemplo, en las publicaciones de Zhao et al. [12] y en alguna muestra de Dapenta et al. [10] se usan árido natural de origen calcáreo u otros que no especifican el origen pero indican que está normalizada, como Parra y Alfaro et al. [1] que explica que el árido natural que usa en su estudio es normalizado UNE EN 196-1.

Para realizar un estudio más exhaustivo de los morteros con AHR, en el presente trabajo se ha propuesto el sustituir el árido natural por el sustituto escogido en diferentes porcentajes de remplazo. Al no sustituir el material por toda su totalidad, se pueden obtener los diferentes comportamientos –tanto en fresco como en endurecido– que puede tener según se va aumentando la cantidad de AHR.

Los AHR en su mayoría tienen que ser machacados antes de su uso; también se habla de diferentes tipos de AHR según su ciclo de molienda si es primario (c1) y si es secundario (c2) [2], [5]. En estos artículos se dice que el uso del c2 es más aconsejado porque el c1 presenta un porcentaje elevado de elementos que pueden perjudicar al mortero. Algunos autores ven como principal inconveniente para su uso que éste árido cuente con una absorción de agua elevada [1], [4], [8], [12], es decir, que para conseguir una misma consistencia que un mortero convencional requiere más cantidad de agua, ya que elevar el contenido de agua final de las mezclas afecta a propiedades como la resistencia a compresión.

Los porcentajes de sustitución de los áridos naturales por los reciclados son muy variados en la literatura, pero los más usados son los de 0% como referencia o testigo [8], [10], [13], 50% y 100% [4], [8], [10], [13]. Aunque también hay porcentajes tan singulares como el que usa Hincapié et al. [14] del 45%, los de Vegas et al. [11] con el 25 y 75% (entre otros) o incluso los de Dapena et al. [10] del 80 y 90% (en que únicamente se estudian morteros con alto porcentaje de AHR).

1.2 MATERIALES Y DOSIFICACIÓN

Las dosificaciones usadas por diferentes autores son similares a las usadas en éste trabajo. Hay algunos que usan relaciones a/c = 3 [10], [13], otros de 4 [8] o incluso de 5 o 6 [13]. Con dosificaciones tan cercanas a las usadas en este trabajo, los resultados deberían ser comparables, si más no, tendrían que tener un comportamiento bastante similar. No todos los resultados son comparables a éste trabajo, únicamente los que usan solo cemento sin aditivos se pueden contrastar ya que éstos pueden influir en las propiedades físicas. Un ejemplo de publicación no confrontable es la de Hincapié et al. [14] ya que usa cal en su mortero de estudio. Un aditivo distinto se usa en la investigación de Dapena et al. [10], en una de sus mezclas usa un superplastificante (en concreto el Sikament 500 HE con alta capacidad de reducción del agua compuesto de una modificación del vinilo-polímero); así que en esta investigación solamente se tendrán en cuenta las otras dos mezclas ya que no usa ningún aditivo y además el árido natural es de origen silíceo.

Es de destacar que no todos los tipos de cemento son iguales, por lo que en función del tipo los resultados pueden variar según la resistencia a compresión especifique el fabricante. Es importante especificar la clase de cemento usado; en la literatura consultada los autores indican el tipo: CEM II/A-L 42,5R [2] o en otras investigaciones que utilizan el CEM I 42,5 N/SR y CEM I 42,5 R/SR [10], incluso, se ha llegado a usar cemento blanco ordinario Portland CEM I 52,5 [12], hecho que hace que las resistencias que llegan a alcanzar las probetas de esta investigación sean muy superiores al resto de estudios e incluso al presente trabajo.

Aunque no esté especificado en las publicaciones, el agua que se usa debe ser potable; también hay quién especifica que la usa desmineralizada [1]. Lo que sí se detalla en alguno de ellos es la cantidad de agua final que se usa después de la prueba de la consistencia o incluso la relación w/c que usan.

Un ejemplo en el que se encuentran los dos casos es la investigación de Zhao et al. [12], en su estudio se hacen dos tipos de mezclas donde en una se usa una relación w/c inicial de 0,5 y en otra 0,6 y en las dos muestras, la cantidad de agua final va aumentando según se va incrementando el porcentaje de AHR. Otras publicaciones que especifican la relación w/c, en este caso final, son las de Braga et al. [7] y Neno et al. [8]. En la primera publicación varían según el porcentaje de árido natural que se sustituya, la relación más baja corresponde al mayor porcentaje de AHR de sus mezclas que es del 15% y la más alta es la de la muestra de referencia; y en la segunda pasa algo singular, en la muestra de referencia se observa la menor relación w/c, con el 20% de AHR ésta llega a aumentar hasta el valor máximo y a medida que el reemplazo del árido natural se va incrementando éste va reduciéndose con la mezcla del 100%.

1.3 ENSAYOS DEL MORTERO

La literatura sobre los morteros no estaría completa sin la evaluación de las propiedades físico-mecánicas. Las muestras para morteros endurecidos usadas en algunas publicaciones se presentan en probetas de dimensiones 4 x 4 x 16 cm [9], [10] para realizar, por ejemplo, ensayos de permeabilidad al vapor [8] o la resistencia a flexión [8]–[10] y compresión [4], [8]–[10], [13]. El resto de morfología de las probetas se hace acorde a la norma correspondiente.

Aunque no se hayan hecho todos los ensayos que se presentan a continuación, el conocimiento de éstos es importante para comprender el comportamiento de los morteros estudiados. Un ejemplo de investigación en el que no se ha adentrado en este trabajo es en el estudio de la interfaz de la microestructura con imágenes SEM, tal y como hace Zhao et al. [12].

1.3.1 ENSAYOS EN FRESCO

La comprobación de las propiedades con el mortero fresco –tales como la consistencia de la mezcla, la densidad, el contenido de aire y la retención de agua– no es primordial en la investigación de un mortero; pero el conocimiento de estas características es necesario para averiguar el comportamiento de los áridos dentro de la mezcla; aunque no todos hacen las pruebas, las que son más comunes son la consistencia y la densidad.

La comprobación de la consistencia no se expone en todas las investigaciones, aunque se tiene que suponer que en todos los estudios se ha hecho. En cambio hay algunas publicaciones en que especifican la consistencia que tratan de conseguir y el agua necesaria para alcanzarlo. En la investigación de Neno et al. [8] usa valores entre 17 y 17,8 cm para el diámetro (tal y como se explica en el apartado 3.1.1) con una cantidad de agua añadida media de 329 g, en la de Braga et al. [7] entre 17 y 17,7 cm de diámetro con una cantidad de agua media de 198 g y Vegas et al. [11] entre 17,3 y 18,1 cm con una cantidad de agua media de 16,89 g.

Aunque no especifica la comprobación de la consistencia en la línea de investigación de Hincapié et al. [14] (en la que utiliza un mortero con cemento y cal) expone que tiene menos capacidad para conservar una manejabilidad satisfactoria en un lapso de tiempo de unos 10 minutos debido quizás al mayor porcentaje de absorción del AHR.

En la investigación de Zhao et al. [12] se especifican las densidades en estado fresco. El resultado de sus morteros con la relación $w/c = 0,5$ y $0,6$ muestran que la densidad de la mezcla de referencia y la del 10% de AHR son iguales, mientras el resto va disminuyendo según se va aumentando la cantidad de AHR; esto se debe a la diferencia de la densidad del AHR con el del árido natural, siendo el primero inferior que el segundo. Otro estudio con un comportamiento semejante es el de Vegas et al. [11]; en él se puede observar cómo se llega a reducir la densidad del mortero de referencia hasta un 22,5% al llegar al 100% de AHR. En cambio en la publicación de Braga et al. [7] se expone un resultado antagónico, cuando se eleva el porcentaje de AHR también se aumenta la densidad.

Pocas investigaciones incorporan el ensayo para el contenido de aire. Entre ellos está Sanabria et al. [2], en el que sus resultados muestran que en los morteros en los que usa AHRc1 el contenido de aire ocluido va aumentando según se incrementa el porcentaje de sustitución del árido natural; mientras que en los morteros con AHRc2 este valor se va menguando según se eleva el contenido de AHR; este resultado puede deberse a la cantidad de impurezas que contienen los AHRc1.

En la publicación de Hincapié et al. [14], también se especifica la retención de agua. En sus morteros elaborados con AHR tienen una reducción de hasta el 25% respecto al de referencia; sin embargo se mejora según se va aumentando la cantidad de cal. En cambio en la investigación de Sanabria et al. [2], los resultados son opuestos para el mortero con los AHRc1; la retención de agua aumenta linealmente, según se incorpora más AHR para sustituir el árido natural respecto a la muestra testigo; aunque los resultados de los morteros con AHRc2 sí que concuerdan con la conclusión de Hincapié et al. Aunque en la línea de investigación de Neno et al. [8] también se muestran los mismos resultados que en el de Sanabria et al., en este caso no se puede afirmar que va aumentando según la cantidad de AHR ya que únicamente hace la prueba con la muestra del 20% comparándolo con el de referencia.

1.3.2 ENSAYOS EN ENDURECIDO

Hay comprobaciones de las propiedades del mortero endurecido –como la resistencia a flexión, el módulo elástico, la retracción, la densidad aparente, la absorción, la adherencia o la permeabilidad al vapor– que no son esenciales para el conocimiento de éste; pero sí que hay una cualidad fundamental para el estudio: la resistencia a compresión, característica que comprueban los autores a diferentes días de curación.

En la investigación de Hincapié et al. [14] se estudia la resistencia a compresión a los 7 y 28 días; se observa que los morteros, aunque contengan cal en la dosificación, con el 45% de AHR tienen una menor resistencia cuánta más relación a/c ; en esta publicación incide en que el comportamiento es debido a la morfología de los AHR (la angulosidad favorece el fraguado y en la ganancia de resistencia en los primeros días) y de la pasta de cemento adherida en la superficie del agregado. Otra investigación que solamente estudia el mortero con un único porcentaje de sustitución y los hace en su totalidad (100% de AHR) es la de Cabrera et al. [9]; en ella se compara la resistencia a compresión del mortero de AHR según diversas relaciones a/c a 7, 28 y 60 días.

Las resistencias van aumentando según pasan los días pero disminuyen según se aumenta la relación a/c. Dapena et al. [10] en cambio estudia la resistencia a compresión de los morteros con diferentes porcentajes de sustitución; ésta decrece según se aumenta el porcentaje de AHR. En el caso de Sanabria et al. [2] se observan unos comportamientos similares; en su publicación se percibe que –indistintamente del circuito del que proceda el AHR– la resistencia mengua según va aumentando la proporción del AHR. La investigación de Zhao et al. [12] tiene la misma los dos anteriores, aunque no se pueda conocer la evolución de ésta al paso del tiempo ya que solo se hace el estudio a los 28 días. Otros morteros con el comportamiento desfavorable con porcentajes diversos de AHR es el de Braga et al. [7]; aunque se expongan los resultados según el ratio w/c, la capacidad resistente presenta los mismos comportamientos, el mortero con el 15% de AHR (el porcentaje máximo usado en esta investigación) es el que menor resistencia presenta. Incluso la investigación de Vegas et al. [11] se obtienen los resultados concordantes; en ella se usan siete porcentajes diferentes (entre el 0 y 100%, ambos inclusive) y el decrecimiento se muestra lineal. Los resultados antagónicos de Neno et al. [8] hacen contrastar los resultados tan desfavorables de los morteros con porcentajes de AHR mencionados anteriormente; en esta investigación se observa que la resistencia a los 28 días del mortero con el 100% de AHR es superior a los que tienen el porcentaje menor; pero este aumento no es totalmente lineal, ya que el mortero con el 20% de AHR es ligeramente mejor que el del 50%.

La resistencia a flexión no es una de las propiedades que se le exige específicamente al mortero, así que no todas las investigaciones que estudian el comportamiento a compresión lo hacen también a flexión. Pero en algunos casos como Cabrera et al. [9], Dapena et al. [10], Zhao et al. [12], Neno et al. [8], Braga et al. [7] y Vegas et al. [11] sí que se hace. El primero [9] usa mezclas con el 100% de AHR y las compara únicamente entre ellas ya que usa cuatro relaciones a/c diferentes; y como también ocurre en la resistencia a compresión, la resistencia a flexión disminuye según aumenta la relación a/c pero aumenta ligeramente en cada probeta según pasan los días (aunque no es tan exponencial como en la compresión de las mismas). En la investigación de Dapena et al. [10], con los porcentajes diversos que usa, se observa que la resistencia llega a mejorarse con el valor mínimo de AHR (5%) pero a partir de este porcentaje va decreciendo según se aumenta la proporción del reciclado. El comportamiento de las probetas de Zhao et al. [12] es semejante al de Cabrera, pero en este caso el punto de inflexión se produce al 10% de AHR, igual que en las probetas de Vegas et al. [11]. Incluso Neno et al. [8] obtiene una tendencia parecida, pero en su caso es el 20% el valor máximo de resistencia (mejorando el de la referencia). El que tiene una tendencia de decrecimiento lineal constante es el de Braga et al. [7], en él no hay señales de mejora de los morteros respecto al convencional.

El módulo de elasticidad dinámico no se comprueba en todas las investigaciones; entre las publicaciones consultadas para el presente trabajo, únicamente se estudia en las investigaciones de Neno et al. [8], Braga et al. [7] y Vegas et al. [11]. En el estudio de Neno et al. se comprueba el módulo elástico en la segunda etapa que hace de ensayos.

Eso significa que únicamente realiza el ensayo a la probeta que mejor resultados ha dado en la primera etapa (resistencias a compresión y flexión y absorción por capilaridad) y se compara con el de referencia ésta es la del 20% de AHR; la probeta con el 20% presenta un resultado mayor que el de referencia, pero eso no significa que tenga un mejor comportamiento, ya que a mayor módulo elástico más susceptible es el mortero a romperse. En la investigación de Braga et al. [7] también se hace los ensayo en dos etapas; la muestra escogida para realizar los ensayos de segunda etapa es la del 15% de AHR (la cual se comparará con el de referencia) ya que esta investigación quiere estudiar la influencia de los finos del reciclado en los morteros. Igual que Neno, el resultado es desfavorable para el mortero con AHR. Vegas et al. también hace la comparativa del mortero con el porcentaje máximo admisible, en su caso el 25% de AHR, con el de referencia; en este estudio se obtiene el mismo comportamiento, el mortero con reciclado presenta más susceptibilidad a romperse que el mortero convencional que se usa como referencia.

Como el módulo elástico, la retracción tampoco se comprueba en todas las investigaciones y normalmente forma parte de las pruebas que hacen los autores como segunda etapa de ensayos. En la probeta del 20% de AHR de Neno et al. [8] se observa que tiene más variación dimensional, con diferencia, que el de referencia. Igual le pasa a la muestra del 15% de AHR de Braga et al. [7]. En cambio en la investigación de Vegas et al. [11] el ensayo de la retracción se hace en la primera etapa, así que se mide en todas las muestras de estudio pero únicamente a los 28 días; comparando todas sus muestras con diferentes los porcentajes, se observa que cuánta más proporción de AHR, más deformación muestran las probetas. La razón de estos resultados es común para estos autores, la cantidad de finos que contiene el AHR es el causante de este comportamiento.

La investigación de Dapena et al. [10] no estudia las dos propiedades anteriores, pero sí que comprueba la densidad de las probetas a los 28 días; el resultado de sus ensayos muestran que la densidad va decreciendo ligeramente según se aumenta el porcentaje de AHR. Otra investigación de comprueba la densidad en endurecido es la de Vegas et al. [11]; en ésta se observa la misma tendencia, va disminuyendo la densidad linealmente según se aumenta el contenido de AHR. Igual que pasa en la densidad en fresco, la explicación de lo sucedido es que la densidad del AHR es inferior al del árido natural que se ha usado en el correspondiente mortero.

En la investigación de Cabrera et al. [9] se estudia la absorción por capilaridad a 8 h, 1, 3, 5 y 7 días en los morteros con el 100% de AHR pero diferentes relaciones a/c; en él se observa que según pasa el tiempo más cantidad de agua se absorbe; pero lo más singular de los resultados es que esta cantidad de agua no viene vinculada directamente a las diferentes relaciones a/c, eso significa que no se asocia a la cantidad de árido que contiene cada mortero. En cambio Braga et al. [7] usa la misma dosificación pero con diferentes porcentajes de AHR a 28 días; en sus resultados se percibe que según se aumenta la proporción de AHR menos cantidad de agua absorbe la probeta, siendo el 15% el porcentaje máximo de AHR comprobado, la explicación de este resultado es que los finos ocupan el sitio de los poros y al ser menos poroso menos agua se absorbe.

Vegas et al. [11] también comprueba la absorción de agua por capilaridad, en su caso los hace en la segunda etapa con el mortero con el 25% de AHR; en este estudio se concluye que el coeficiente de absorción de la probeta con AHR es mayor que el del mortero de referencia.

Otra propiedad que se estudia en los morteros de albañilería es la adherencia. En las muestras de Hincapié et al. [14] se observa que el mortero sin cal en la dosificación mejora la adherencia a los 28 días respecto a los que sí la contienen. En la probeta con el 20% de AHR de Neno et al. [8] tampoco se observan mejoras respecto al de referencia con el mismo tiempo se curado. En cambio en la investigación de Braga et al. [7] se percibe lo contrario, la muestra con el 20% de AHR muestra mejoras en la adherencia respecto al testigo sin reciclado.

La permeabilidad al vapor también es una propiedad que también se estudia. Neno et al. [8] la comprueba a 28 días de curación; su resultado muestra que la de la probeta con el 20% de AHR es mayor que la de referencia; la causa viene vinculada también a la cantidad de finos del reciclado, que al ser más porosos y con una absorción del agua también mayor que los de los naturales, dejan circular el vapor de agua por su interior. Vegas et al. [11] con la probeta del 25% de AHR obtiene el mismo comportamiento que Neno, En cambio, Braga et al. [7] obtiene unos resultados contrarios a los anteriores; en este caso la permeabilidad se hace a los 60 días de curado y mejora con la probeta del 15% de AHR respecto al de referencia, así que en esta investigación se concluye que el mortero con reciclado ayuda a secar la condensación en la superficie.

CAPÍTULO II. MORTERO, MATERIALES Y MEZCLAS

En este capítulo se describe la definición del mortero, los materiales utilizados y la elaboración de las muestras de mortero. Para el proceso experimental, es tan importante seguir las normas estipuladas —en este caso las ASTM o la correspondiente norma UNE en el caso pertinente—, cómo la elección de los materiales.

2.1 EL MORTERO

Antes de definir los materiales que se han utilizado para llevar a cabo los ensayos, se hace la definición del mortero. Según la RAE [15] es un conglomerado o masa constituida por arena, conglomerante y agua que puede contener algún aditivo. En este estudio, el mortero consta de arena o árido natural y/o de origen reciclado, cemento como conglomerante y agua. Los diferentes materiales serán definidos en los siguientes apartados.

Existen diferentes tipos de morteros que se pueden clasificar según el concepto, sistema de fabricación, propiedades y/o su aplicación y por el tipo de conglomerante [16], y que para poder definir el utilizado en este trabajo, es necesario conocer más sobre las propiedades físicas del mismo. A priori, se puede decir que es un mortero de cemento, ya que éste es su único conglomerante. Aunque se puede decir cuál podría ser su posible uso teniendo en cuenta la relación a/c usada; según los apuntes de la asignatura de Materiales de la Construcción I, con las relaciones a/c utilizadas en este trabajo, su uso podría ser para elementos con resistencia mecánica, por ejemplo paredes resistentes muy compactas.

2.2 ORIGEN DE LOS MATERIALES

Los materiales usados en el proceso experimental son arena natural, áridos de hormigón reciclado, cemento (como conglomerante) y agua.

2.2.1 ÁRIDOS

Se necesita la caracterización granulométrica de los áridos para poder ajustarlos bien en las mezclas. La norma ASTM C144 [17] especifica la caracterización para morteros de fábrica. El tamaño del árido no debe pasar de 4 mm y se deberá tener en cuenta el contenido de finos (partículas de dimensiones inferiores a 0,075 mm, No.200). Con los datos previos y los obtenidos en los ensayos, se definirá cada árido según el tamaño mínimo y máximo del árido (en mm), la forma de presentación (rodados, triturado o machacado) y su naturaleza (calcáreo, silíceo, artificial, reciclado, etc.) [16].

Para conocer las propiedades de los áridos se realizan pruebas de densidad en estado desecado (OD), en estado saturado superficialmente seco (SSD) y absorción siguiendo la norma ASTM C128-04 [18]. Para la obtención de la cantidad de finos que pasan por la malla No. 200 (partículas < 0,075 mm) se dispone de la norma ASTM C136-06 [19].

Para definir el porcentaje de árido grueso y de fino se usa la norma ASTM C29 [20] para determinar la densidad aparente en seco. Primero se tamiza el árido con la malla No. 30 para conseguir los dos gruesos de árido; se rellena el recipiente estipulado en la norma con diferentes porcentajes: 90% grueso – 10% fino, 80% grueso – 20% fino, etc. Hasta llegar al 10% grueso y 90% fino; y se llega a la conclusión que la máxima compacidad se produce la proporción es de 60% de árido grueso y 40% de árido fino de AHR y de 50% de árido grueso y 50% fino para los AN. Así que se usarán estas proporciones para el diseño de los morteros.

Antes de usar los áridos, éstos se tienen que preparar. Para hacer las mezclas primero se seca el árido –para los dos tipos de áridos se utiliza el mismo proceso– en el horno a 110°C según la norma ASTM C136-06 [19]; por consiguiente, después de sacarlo del horno se deja enfriar para poder manipularlo. Se tamiza manualmente con dos tipos de mallas ASTM diferentes, No. 4 de abertura 4,75 mm (ver Ilustración 1 a) y No. 30 de 0,6 mm (b). Las partículas retenidas en la malla No. 4 se desechan (a); el resto de material se hace pasar por la malla No. 30, el retenido en esta malla se denominó árido grueso. El material retenido lo se denominará árido grueso (a). El material que pasa de la malla No. 30 y se queda retenido en la base (c), es el que se denominó árido fino (b).



Ilustración 1. Tamizado con las mallas No. 4 y 30 de la ASTM

Fuente: Elaboración propia

- a) Malla ASTM No. 4, material retenido es de desecho
- b) Malla ASTM No. 30, material retenido es árido grueso
- c) Base metálica, material retenido es árido fino

En la Ilustración 2 se puede observar el AHR, una vez tamizado por las diferentes mallas.



Ilustración 2. Comparación de los áridos tamizados

Fuente: Elaboración propia

- a) Árido tamizado que pasa por la malla ASTM No. 4 (de 4,75 mm de abertura)
- b) Árido tamizado que pasa por la malla ASTM No. 30 (de 0,6 mm de abertura)

Este proceso se lleva a cabo para ambos áridos. Todo el material se almacena en diferentes recipientes teniendo en cuenta que no estén cerca de sitios húmedos para evitar que absorban humedades y se altere su composición ni que se contaminen con otros materiales ni entre ellos.

2.2.1.1 ÁRIDO NATURAL

El árido natural (AN) usado es arena natural de sílice normalizada de una empresa local comercializadora de áridos para la construcción. Es una arena fina lavada (el tamaño máximo es de 3 mm). Las propiedades físicas de la arena que se han obtenido con base a las normas ASTM, y se pueden observar en la Tabla 2; la granulometría de la misma se presenta en el Figura 1.

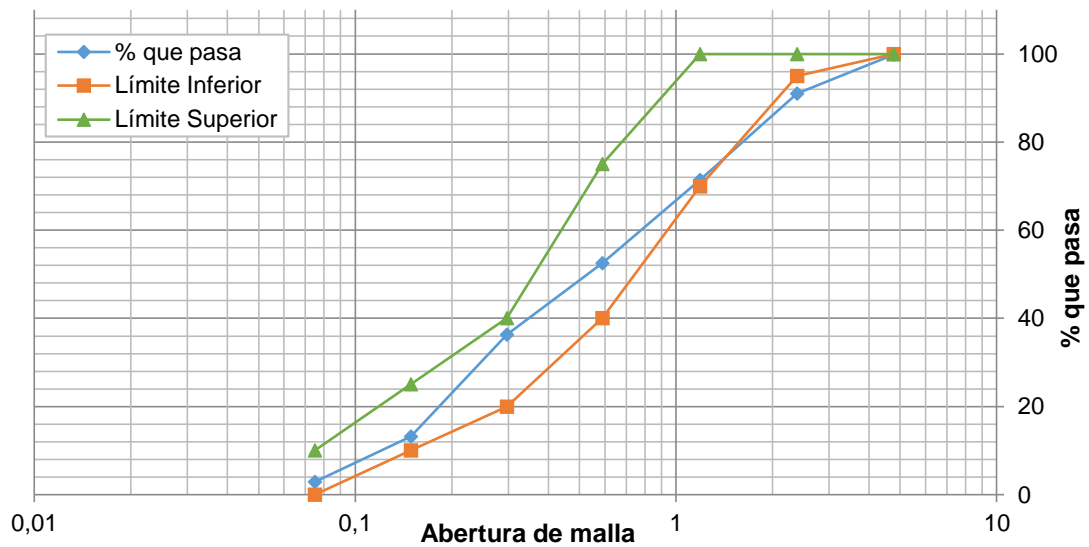
Tabla 2. Propiedades físicas AN

Propiedad		Valores	Unidades
Densidad aparente	OD*	2581,6	kg/m ³
	SSD*	2623,6	kg/m ³
Coeficiente de absorción		1,6	%
Módulo de finura		2,4	
Partículas < 0,075 mm (No.200)		2,90	%

* OD = en estado seco; SSD = estado seco superficialmente húmedo.

Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Granulometría de la arena natural



Fuente: Elaboración propia

Este árido tiene el canto rodado gracias a su origen natural. Con esta morfología se consigue una mejor trabajabilidad, necesita menos agua y el grano tiene mejor dureza. Además por ser de origen silíceo, son más estables ya tienen una alta resistencia a la meteorización y descomposición. Así que con los datos obtenidos se puede definir el árido:

0/4 – R – S

2.2.1.2 ÁRIDO DE HORMIGÓN RECICLADO

El árido de hormigón reciclado (AHR) usado en este estudio proviene de la empresa *RECICLÀRIDS, SL* de Sant Joan de Vilatorrada, la cual tiene su planta de reciclaje en Fonollosa, Barcelona.

Este material fue analizado por la empresa EPTISA de Cerdanyola del Vallés, lo denominan *TOT-U Reciclado de piedra y hormigón* y su composición según los datos proporcionados por la empresa se presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición y características del AHR

Contenido de impurezas (UNE EN 933-11:2009/AC:2010)	Valor	Unidad
Material flotante	2,5	cm ³ /kg
Albañilería hormigón	19	%
Áridos no tratados – Piedra natural	20	%
Albañilería de arcilla	59	%
Materiales bituminosos	1	%
Vidrio	0,1	%
Otros: arena, metales, plástico y yeso	0,3	%

Densidad relativa y absorción de áridos finos y gruesos (UNE EN 1097-6)	Valor	Unidad
Densidad relativa real de árido fino	2,70	g/cm ³
Absorción de árido fino	12,1	%
Densidad relativa real de árido grueso	2,65	g/cm ³
Absorción árido grueso	16,3	%

Fuente: Eptisa [21]

La forma del AHR es importante ya que como se verá en los ensayos siguientes, es crucial para las propiedades del mortero. La forma es totalmente diferente a la del árido natural; tiene una forma angulosa debido al proceso de triturado por machaque de donde se ha obtenido. Las partículas angulosas y alargadas requieren más pasta de cemento y mayor cantidad de agua para que sea trabajable [14]. A partir de los datos obtenidos se puede designar al AHR como sigue:

$$0/4 - T - R$$

Al igual que para el AN, se obtienen las siguientes propiedades físicas del AHR (Tabla 4), según la normativa; la granulometría de la misma se presenta en la Figura 2.

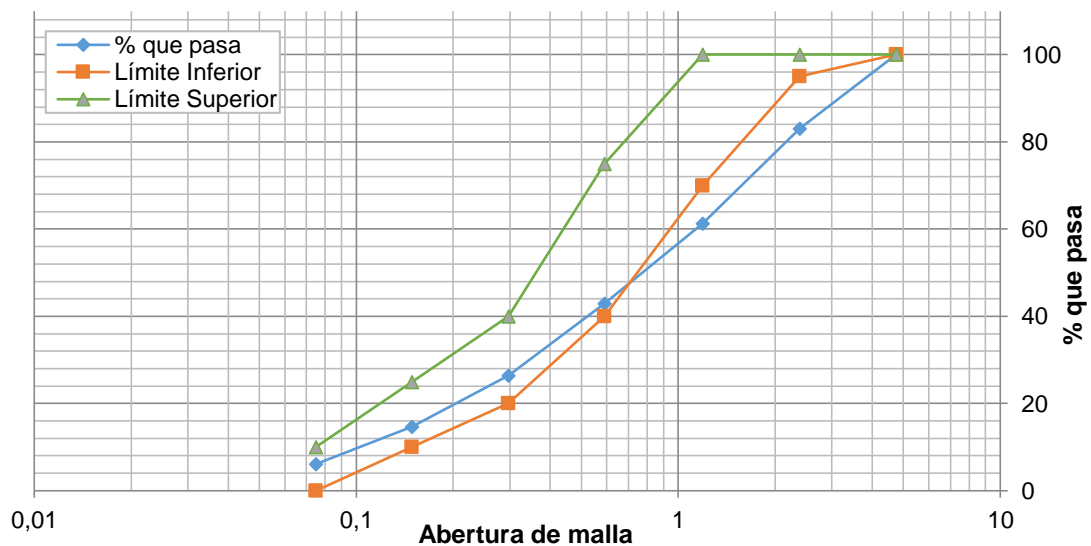
Tabla 4. Propiedades físicas del AHR

Propiedad	Valores	Unidades
Densidad aparente	OD*	2189,7 kg/m ³
	SSD*	2362,6 kg/m ³
Coefficiente de absorción	7,9	%
Módulo de finura	2,7	
Partículas < 0,075 mm (No.200)	6,16	%

* OD = en estado seco; SSD = estado seco superficialmente húmedo.

Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Granulometría del árido de hormigón reciclado AHR



Fuente: Elaboración propia

Con las propiedades físicas de los dos tipos de árido se puede concluir que:

- Las densidades aparentes de AHR, tanto OD como SSD, son visiblemente más bajas; en concreto tienen un descenso del 15% y del 10% respectivamente.
- El coeficiente de absorción de AHR es casi cinco veces mayor que el del AN
- El módulo de finura del árido natural es un 11% menor la del AHR.
- Se observa una gran diferencia en el porcentaje del contenido de partículas finas (tamaños de hasta 0,075 mm). En el AN pasa un 3% menos que en los de AHR.

2.2.2 CONGLOMERANTE. CEMENTO

El conglomerante usado en el estudio es un cemento portland UNILAND según la norma UNE 80303-1 se designa CEM I 42,5 N/SR, tal y como se muestra en la Ilustración 3. Es un cemento normal de Clínter sin aditivos que tiene una resistencia media-alta de 42,5 MPa a 28 días y es resistente a sulfatos. Las especificaciones del fabricante se muestran en la Tabla 5. Tiene una superficie específica baja que permite una menor demanda de agua manteniendo la plasticidad y disminuye el riesgo de retracciones [22].



Ilustración 3. Saco de 25 kg de cemento Portland UNILAND CEM I 42,5 N-SR 5 usado en las mezclas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Características del cemento CEM I 42,5 N/SR

	Características del cemento	Norma	Habitual
Componentes*	Clinker (%)	95-100	95
	Caliza (L) (%)	-	5
	Puzolana (P) (%)	-	-
	Cenizas volantes (V) (%)	-	-
	Escoria siderúrgica (S) (%)	-	-
	Regulador de fraguado, "yeso" (%)	-	4
Químicas	Trióxido de azufre (SO ₃) (%)	3,5 máx.	3,2
	Cloruros (C ⁻) (%)	0,10 máx.	0,01
	Pérdida por calcinación (%)	5 máx.	2,6
	Residuo insoluble (%)	5 máx.	1,3
Físicas	Superficie específica Blaine (cm ² /g)	-	3.000
	Expansión Le Chatelier (mm)	10 máx.	0
	Tiempo de inicio de fraguado (minutos)	60 mín.	160
	Tiempo final de fraguado	-	210
Mecánicas	Compresión a 1 día (MPa)	-	15
	Compresión a 2 días (MPa)	13 mín.**	27
	Compresión a 7 días (MPa)	-	39
	Compresión a 28 días (MPa)	42-62	49
Adicionales	C3A	5 máx.	4
	C3A + C4AF	22 máx.	16

Fuente: Grupo Cementos Portland Valderrivas [22]

2.2.3 AGUA DE AMASADO

El agua es un factor importante para la constitución de la mezcla ya que, según los componentes que pueda tener, puede reaccionar con el resto de material cambiando así sus propiedades.

Cómo las probetas están hechas con el agua potable, en el laboratorio de materiales situado en la EPSEB de la UPC ubicado en el Campus Sud de Barcelona. Los datos del agua usada para las mezclas se corresponden a las de la red de las Aguas de Barcelona. Se describe el agua cómo dura, es decir, que tiene un alto contenido de calcio y magnesio procedente del contacto con el suelo calcáreo. Algunas características se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Características del agua de Barcelona del año 2014

	VALOR MEDIO	UNIDADES
CARACTERÍSTICAS GENERALES E INDICADORES		
Temperatura	17,8	°C
pH	7,7	Unidades de pH
Conductividad a 20°C	690	µs/cm
Cloruros	104,00	mg Cl/l
Sulfatos	74,50	mg SO ₄ /l
Fluoruros	<0,1	mg F/l
Nitratos	5,93	Mg NO ₃ /l
Sodio	55	mg/l
PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NO REGULADOS		
Calcio	67	mg/l
Magnesio	14,00	mg/l
Potasio	10	mg/l
Bicarbonatos	184,00	mg HCO ₃ /l

Fuente: Agbar, Aigües de Barcelona [23]

2.3 DOSIFICACIÓN

Se realizaron dos grupos de mezclas de morteros (MHR) con los mismos porcentajes de sustitución de AHR (10, 20, 30, 50 y 100%); el primero para dosificaciones con relación a/c = 3,25, y el segundo con a/c = 4,75. La nomenclatura de las mezclas se hace en dos grupos con los mismos porcentajes de AHR. El primer grupo (MHR-I) tiene las dosificaciones con la relación a/c = 3,25 y el segundo de a/c = 4,75 (MHR-II); la nomenclatura utilizada en los morteros se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Nomenclatura de las mezclas según el porcentaje de AHR de sustitución

	Nomenclatura					
	0% AHR	10% AHR	20% AHR	30% AHR	50% AHR	100% AHR
a/c = 3,25	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
a/c = 4,75	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran las dosificaciones teóricas e iniciales de una probeta de 4x 4 x 16 cm, como se muestra en las Tablas 8 y 9, que se usaron para los ensayos del mortero endurecido de resistencia a compresión y flexión, módulos de elasticidad dinámico y densidad aparente; y de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm usadas para los ensayos de retracción, presentadas en las Tablas 10 y 11.

Tabla 8. Dosificación de la mezcla de relación a/c = 3,25 para una probeta de 4 x 4 x 16 cm con la cantidad de agua teórica. Cantidades en gramos

Relación a/c = 3,25						
		MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
CEMENTO		136,57	110,35	120,81	115,05	130,43
AN	GRUESO	199,70	143,35	137,42	93,49	0,00
	FINO	199,70	143,35	137,42	93,49	0,00
AHR	GRUESO	26,64	43,05	70,70	112,17	254,34
	FINO	17,74	28,70	47,09	74,79	169,56
AGUA		60,69	63,29	65,89	77,85	104,38

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Dosificación de la mezcla de relación a/c = 3,25 para una probeta de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm con la cantidad de agua teórica. Cantidades en gramos

Relación a/c = 3,25						
		MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
CEMENTO		117,98	76,78	84,06	90,75	90,75
AN	GRUESO	172,52	99,75	95,62	73,74	0,00
	FINO	172,52	99,75	95,62	73,74	0,00
AHR	GRUESO	23,01	29,95	49,19	88,48	176,97
	FINO	15,33	19,97	32,76	58,99	117,98
AGUA		42,23	44,04	45,84	61,41	72,63

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Dosificación de la mezcla de relación a/c = 4,75 para una probeta de 4 x 4 x 16 cm con la cantidad de agua teórica. Cantidades en gramos

Relación a/c = 4,75						
		MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
CEMENTO		87,78	84,77	82,60	83,24	80,54
AN	GRUESO	187,63	161,07	137,32	98,85	0,00
	FINO	187,63	161,07	137,32	98,85	0,00
AHR	GRUESO	25,01	48,33	70,63	118,62	229,53
	FINO	16,68	32,21	47,09	79,08	153,02
AGUA		53,30	54,00	55,08	60,47	70,50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Dosificación de la mezcla de relación a/c = 4,75 para una probeta de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm con la cantidad de agua teórica. Cantidades en gramos

		Relación a/c = 4,75				
		MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
CEMENTO		61,08	59,46	59,46	57,92	55,07
AN	GRUESO	130,56	112,97	98,85	68,78	0,00
	FINO	130,56	112,97	98,85	68,78	0,00
AHR	GRUESO	17,40	33,89	50,84	82,53	156,96
	FINO	11,60	22,59	33,89	55,03	104,64
AGUA		37,08	37,87	39,64	42,07	48,21

Fuente: Elaboración propia

2.3.1 PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS Y PROBETAS

Antes de comenzar las mezclas se tiene que tener todos los materiales y utensilios preparados. Los tiempos en que se realizan las mezclas son muy importantes, así que se tiene preparado el siguiente material que se muestra en la Ilustración 4.



Ilustración 4. Material inicial usado para la realización de las mezclas

Fuente: Elaboración propia

- a) Balanza de tara 2.000 g de precisión 0,01 g y recipiente
- b) Pala
- c) Vasos medidores y pipeta
- d) Espátula
- e) Recipiente de la mezcladora
- f) Áridos naturales de sílice
- g) Áridos de hormigón reciclado AHR
- h) Cemento

La elaboración empieza con la determinación la masa de los elementos por separado con la balanza en el recipiente (ver Ilustración 4 d) según la dosificación precisada por cada mezcla con su respectivo porcentaje de sustitución del árido natural. Primero se pesa el árido natural grueso y se deposita en el recipiente de la mezcladora (a), que previamente se ha humedecido su superficie interior con agua; a continuación se hace lo mismo con el árido natural fino. El AHR se pesa y se pone después en el mismo orden que el árido natural (primero el grueso y luego el fino). Para ayudar a la mezcladora, se bate el árido del recipiente de mezclas con la pala (b) con movimientos envolventes.

La mezcla se hace según la norma ASTM C305 [24] pero con algunos cambios. Cuando ya se tiene el árido mezclado en el recipiente, se procede a pesar el cemento y el agua con un vaso medidor apurando la medida con una pipeta (c); con todos los elementos ya pesados, se ejecuta la mezcla. Primero se introduce el agua en recipiente con los áridos y se deja absorber durante 60 segundos controlados con el cronómetro, pasado ese tiempo se vierte el cemento y con ayuda de una espátula se mezcla lo suficiente para que el cemento se humedezca; esto se hace para que no se levante el polvo cuando comienza a funcionar la mezcladora, como la que se muestra en la Ilustración 5.



Ilustración 5. Máquina mezcladora con dos velocidades

Fuente: Elaboración propia

Con todos los elementos dentro del recipiente de la mezcladora (e), éste se pone en marcha a velocidad baja durante 60 segundos y después a velocidad alta durante 30 segundos más. Pasado este tiempo, se detiene la máquina controlando el tiempo transcurrido y se saca el recipiente para despegar los restos que no se han mezclado de sus paredes con ayuda de una espátula. Desde que se detiene la mezcladora, se dejan pasar 90 segundos; transcurrido ese tiempo se vuelve a introducir en el aparato y se pone a velocidad alta durante 60 segundos más.

Después de comprobar la consistencia (ver 3.1.1), se procede a rellenar los moldes. Se hacen probetas de dos tipos: con moldes metálicos paralelepípedos desmontables con tres compartimentos de dimensiones 4 x 4 x 16 cm (ver Ilustración 6) y otros con moldes metálicos paralelepípedos desmontables con tres compartimentos de dimensiones 2,5 x 2,5 x 28,5 cm con pernos en los extremos (ver Ilustración 7).

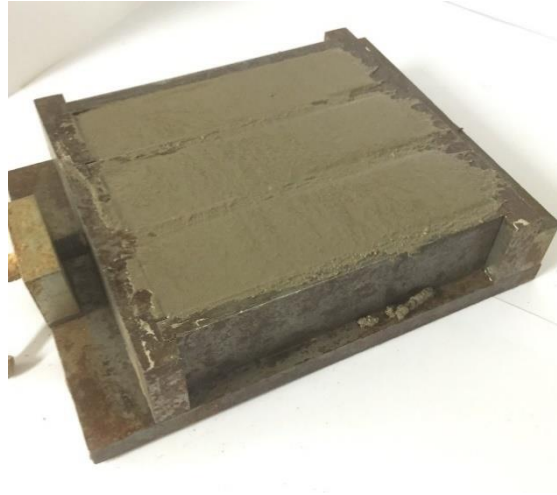


Ilustración 6. Molde metálico desmontable de 4 x 4 x 16 cm

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 7. Molde de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm con pernos en los extremos para los ensayos de retracción

Fuente: Elaboración propia

Para el relleno de los moldes se precisa de una máquina vibradora como se muestra en la Ilustración 8, para eliminar –en su mayor medida– los posibles poros creados en el interior de la mezcla. El procedimiento empieza rellenando los moldes con la ayuda de una espátula hasta la mitad, después se vibra el molde con la mezcla durante cinco segundos. Enseguida se rellena hasta el límite del molde y se vuelve a vibrar otros cinco segundos. Con ayuda de la espátula se aplanla la superficie superior, añadiendo más mezcla si fuera necesario para conseguir una superficie lo más uniforme posible.



Ilustración 8. Máquina para el vibrado de las probetas

Fuente: Elaboración propia

Una vez que se tiene las mezclas en los moldes se dejan curar 24 horas en la cámara húmeda. Pasado ese tiempo se desmoldan con cuidado, se marcan con permanente para identificarlos y se sumergen en agua para dejarlos curar hasta el día del ensayo, como se puede comprobar en la Ilustración 9, para su curación.



Ilustración 9. Contenedor lleno de agua para sumergir las probetas para la curación dentro de la cámara húmeda

Fuente: Elaboración propia

Las probetas de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm son exclusivamente para la retracción. Se hacen seis para cada mezcla, tres son para medirlas tal cual están hechas y las otras tres de cubren con una capa de parafina y se envuelven con papel de aluminio. Éstas se dejarán dentro de la cámara húmeda durante los primeros 28 días de curado, a partir del día 29 se sacan y se dejan a la temperatura y humedad del laboratorio.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA. PROCESO EXPERIMENTAL

En el siguiente capítulo se explica el proceso desarrollado en el laboratorio para obtener las propiedades físicas, tanto en fresco como en endurecido, de los morteros con árido reciclado de hormigón (MHR). En los ensayos se irán variando los porcentajes de AHR para poder comparar los resultados (ver en el Capítulo IV).

3.1 ENSAYO DEL MORTERO FRESCO

Las propiedades en estado fresco de los MHR se han obtenidos a partir de los ensayos realizados una vez que se concluye el proceso de mezclado; se realizan la prueba de consistencia, densidad y contenido de aire, siguiendo la normativa especificada en la Tabla 12.

Tabla 12. Normativa usada para los ensayos del mortero fresco

Ensayo	Normativa
Consistencia	ASTM C230 [25] y ASTM C1437 [26]
Densidad y contenido de aire ocluido	ASTM C185-99 [27] y ASTM C231 [28]

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 CONSISTENCIA

La prueba de consistencia, se rige según la norma antes especificada (Tabla 12), la cual su arreglo experimental consiste en una mesa de sacudidas (Ilustración 10 b) la cual realiza movimientos de caída (realizando de forma manual 25, en un lapso de 15 segundos) ocasionando que la mezcla dispuesta en la placa superior, se extienda de forma horizontal en todas las direcciones, como se muestra en la Ilustración 11. La fluidez se determina con el promedio de las medidas de los diámetros perpendiculares que para este trabajo se buscó obtener una consistencia constante que permitiera una fluidez de $110 \pm 5\%$ (según la norma ASTM C109 [29]) para todas las mezclas de estudio. Tomando en cuenta el diámetro inferior del molde (10 cm) (Ilustración 10 a), la consistencia buscada debe estar entre 20,5 y 21,5 cm.



Ilustración 10. Arreglo experimental para consistencia: a) Mesa de sacudidas, b) Molde normalizado y c) Pisón.

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo es el siguiente: primero se rellena el molde hasta la mitad (Ilustración 10 a), se apisona 10 veces procurando hacer toda la superficie uniformemente. Después se vuelve a rellenar hasta el aro superior del molde para volver a apisonar 10 veces más su superficie, se enrasa la mezcla en el molde y se lleva a cabo el procedimiento explicado por la norma. Una vez realizadas las mediciones de los diámetros, se verifica si presenta la consistencia deseada. Se mide el diámetro resultante con la regla (Ilustración 11).

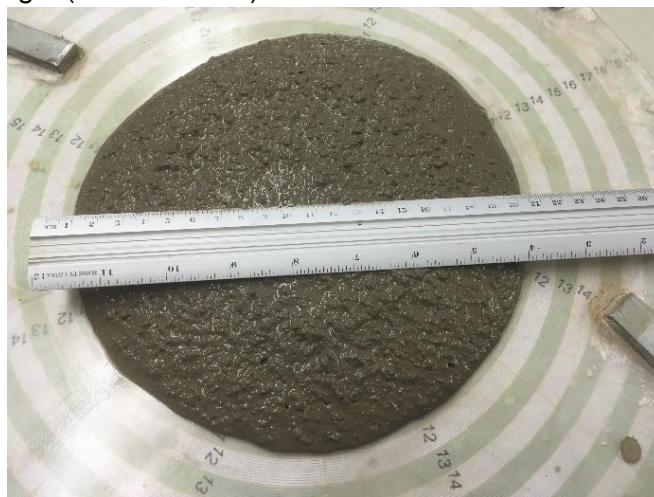


Ilustración 11. Medición del diámetro resultante para el ensayo de consistencia

Fuente: Elaboración propia

Si el valor es inferior al mínimo, se incorpora el agua suficiente para conseguir un valor dentro del rango. Al incorporar el agua, se debe volver a poner en la mezcladora a velocidad baja durante 30 segundos y después 30 segundos más a velocidad alta. Si no se agrega el agua suficiente después de comprobar la consistencia y al realizar el ensayo de nuevo no se consigue el valor necesario, se vuelve a agregar más agua. En el caso de que se tenga que repetir varias veces, se intenta agregar el agua suficiente hasta llegar al valor dentro del rango, pero la mezcla se descarta ya que se habrá mezclado más de lo necesario. Además el agua se va evaporando a medida que pasa el tiempo. El hecho de agregar el agua suficiente para conseguir la consistencia, aunque finalmente no se use la mezcla, es debido a que así se tiene una referencia de la cantidad de agua necesaria para conseguir la consistencia adecuada. Así que al realizar la mezcla de nuevo, se añade al agua inicial una cantidad menor a la suma del agua agregado final y se vuelve a realizar el ensayo de consistencia.

Si por el contrario el valor de la medida de la consistencia es mayor a máximo, la mezcla se deberá de descartar. Al volver a hacer la nueva mezcla, se tendrá que reducir la cantidad de agua inicial.

Los valores del agua pueden variar entre mezclas con la misma dosificación si éstas se han producido en diferentes días ya que las condiciones del laboratorio (humedad y temperatura) no siempre son las mismas. Otro factor que hace variar la cantidad de agua final es el rango amplio que hay para conseguir la misma consistencia, es decir, si se acerca al límite inferior del rango (20,5 cm) habrá menos cantidad de agua que si se acerca al límite superior (21,5 cm).

3.1.2 DENSIDAD DEL MORTERO FRESCO

La densidad de las mezclas de mortero en su estado fresco, es afectada por la forma del árido, la cantidad de finos, la cantidad de agua final de la mezcla y el contenido de aire interior. Siguiendo lo especificado por la norma ASTM C185 [27] se realiza el ensayo correspondiente para obtener la densidades de las mezclas de estudio; para este estudio, con un recipiente normalizado de 1L fue utilizado (Ilustración 12).



Ilustración 12. Molde de 1L de capacidad y balanza de tara 4.000 g y 0,01 g de precisión

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo fue el siguiente: primero se pesa el molde (previamente humedecido el interior con agua) con la balanza de tara 4.000 g con una precisión de 0,01 g (Ilustración 12) y se obtiene la masa del molde. Se incorpora la mezcla de mortero en tres capas, apisonado 20 veces con el pisón cada una de ellas forma uniforme por toda la superficie, se enrasa la superficie y se limpia la cara exterior del molde (teniendo cuidado de dejar la menor cantidad de partículas que hayan podido caerse durante la introducción de la mezcla en el molde), se pesa en la balanza y se obtiene la masa del molde con la mezcla.

Una vez se tienen los datos recopilados, se procede a hacer el cálculo de la densidad teniendo en cuenta el volumen del recipiente (de 1 L). Primero se determina la masa de la mezcla, la cual se obtiene a partir de los datos obtenidos (diferencia entre la masa del molde con la mezcla y la masa del molde vacío). Una vez obtenida la masa de la mezcla, se calcula la densidad con la fórmula (1) y se obtienen los resultados reportados en la Figura 4.

$$Densidad = \frac{masa_{mortero}}{volumen_{molde}} \quad (1)$$

3.1.3 CONTENIDO DE AIRE OCLUÍDO

El ensayo para obtener el contenido de aire de la mezcla en fresco se realiza siguiendo el procedimiento que especifica la norma ASTM C185 [27], usando un aparato para la medición del tipo B (Ilustración 13), pero con capacidad de 1 L en vez de los 440 mL que se estipula.



Ilustración 13. Instrumental para el ensayo de contenido de aire de 1L de capacidad
Fuente: Elaboración propia

3.2 ENSAYOS DEL MORTERO ENDURECIDO

Las propiedades en estado endurecido de los MHR se obtienen a partir de los ensayos de resistencia a compresión y a flexión, mediante la obtención del módulo elástico estático y dinámico, la retracción por secado y la densidad aparente que se realizan, siguiendo la normativa especificada en la Tabla 13.

Tabla 13. Normativa usada para los ensayos del mortero endurecido

Ensayos	Normativa	Unidades por cada muestra	Edad de curado (días)
Resistencia a compresión	ASTM C349 [30]	3	3, 7, 28, 60 y 90
Resistencia a flexión	ASTM C348 [31]	3	3, 7, 28, 60 y 90
Análisis del módulo elástico dinámico (MOE_D) mediante la frecuencia de ondas sonoras	UNE-EN-ISO 12680-1 [32]	3	3, 7, 28, 60 y 90
Análisis del módulo elástico dinámico (MOE_D) mediante la velocidad de propagación de ultrasonidos	UNE-EN-ISO 12504-4 [33]	3	3, 7, 28, 60 y 90
Retracción por secado	ASTM C490 [34] y ASTM C596 [35]	6	1, 3, 7, 14, 28, 29, 31, 35, 42, 56, 68, 88 y 118
Densidad aparente y relativa, índice de porosidad	UNE EN 1015-10 [36] y UNE EN 1015-18 [37]	3	28 y 60

Fuente: Elaboración propia

Se usan las probetas de 4 x 4 x 16 cm previamente sumergidas, teniendo en cuenta los días de curado; se pesan en una báscula de 2.000 g y 0,01 g de exactitud y se miden con un pie de rey todas las caras, por los dos extremos para hacer la media de las longitudes para determinado el volumen.

Las medidas pueden tener un error de ± 1 mm, como se muestra en la Ilustración 14, ya que están hechas con moldes desmontables de hierro. Sin dejar que se sequen las probetas, se procede a practicar los ensayos.



Ilustración 14. Recogida de datos de las medidas de las probetas 4 x 4 x 16 cm

Fuente: Elaboración propia

Para las probetas de retracción se usan las medidas 2,5 x 2,5 x 28,5 cm con pernos en los extremos más estrechos para la lectura de los datos. Hay tres probetas selladas con parafina y papel de aluminio y tres sin, como se muestra en la Ilustración 15.



Ilustración 15. Probetas de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm para los ensayos de retracción

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para hacer los ensayos se hacen a partir de lo que marca la norma C349 [30]. Las probetas se van sacando del contenedor dónde han estado sumergidos durante los días estipulados de curación (3, 7, 28, 60 y 90); no se hacen más de dos mezclas por cada ensayo (seis probetas en total), ya que el tiempo en que se realizan los ensayos es importante. Antes de ser ensayadas para la resistencia a compresión, estas probetas se han ensayado para el MOE_D mediante la propagación de las ondas sonoras y ultrasonido (ver los apartados 3.2.4 y 3.2.5 respectivamente) y para la resistencia a flexión (ver el apartado 3.2.2). El ensayo de la resistencia a compresión es una de las más importantes, ya que al mortero principalmente se le exige un buen comportamiento a compresión. Este ensayo se considera destructivo.



Ilustración 16. Realización del ensayo a compresión de la probeta 4 x 4 x 16 cm a 1,8 mm/min

Fuente: Elaboración propia

La máquina que se usa tanto para los ensayos de flexión como de compresión es una prensa con una carga máxima de 5000 kg (ver Ilustración 16) y tiene acoplado un sensor de desplazamiento que capta los datos y los transmite al PC.

Para proceder a hacer el ensayo, se necesita coger una de las partes procedentes de la rotura en dos que se produce en el ensayo para la resistencia a flexión (ver el apartado 3.2.2); en dicho ensayo no siempre se rompen exactamente en dos piezas iguales, así que es preferible escoger el trozo más corto porque el trozo sobrante se usará para el ensayo de la densidad aparente (ver el apartado 3.2.7). Una vez escogido que fracción se va a usar, se procede a preparar la máquina; se pone el accesorio dónde se pondrá la pieza y que ejercerá la carga directamente (Ilustración 16). Se tendrá en cuenta que la presión se tiene que ejercer sobre las superficies lisas y uniformes para que se transmitan bien, así que para que todas las muestras se hagan igual, la superficie más rugosa –la cara superior de la probeta al fabricar el molde– se pone hacia la parte frontal. Se tiene que ajustar la superficie de las dos placas a las de la probeta que se está ensayando para que estas queden totalmente en contacto cuándo se ensaye.

Se deja la superficie de la placa a poca distancia de la probeta, teniendo en cuenta que no estén en contacto para que no se ejerza ninguna fuerza hasta que se comience la prueba. Una vez colocada la probeta, se regula la velocidad en que se realizará, en este caso es de 1,8 mm/min; con el PC y el aparato auxiliar para el proceso de los datos conectados, se comienza el ensayo. Mientras el ensayo está en proceso, el programa va graficando los datos y crea una curva según la carga (en kg) y la deformación (en mm) tal y como se muestra en la Ilustración 17.

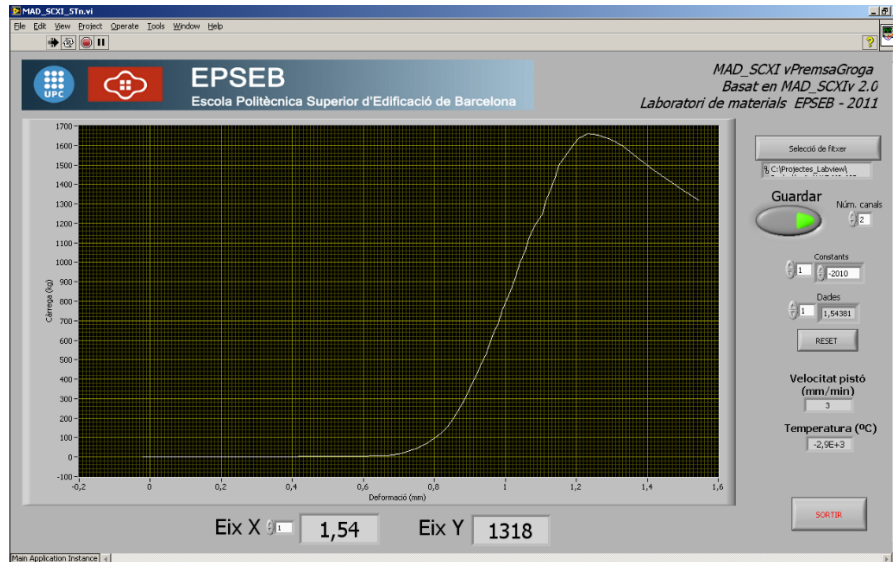


Ilustración 17. Ejemplo del gráfico de los datos que el programa informático recoge durante el ensayo de la resistencia a compresión

Fuente: Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Con los ensayos hechos, se guardan los datos que ha procesado el programa del PC en un archivo (.txt); de los datos que nos ofrece el archivo se coge el valor de la carga máximo y los datos necesarios para hacer el MOE_E (cargas y deformación).

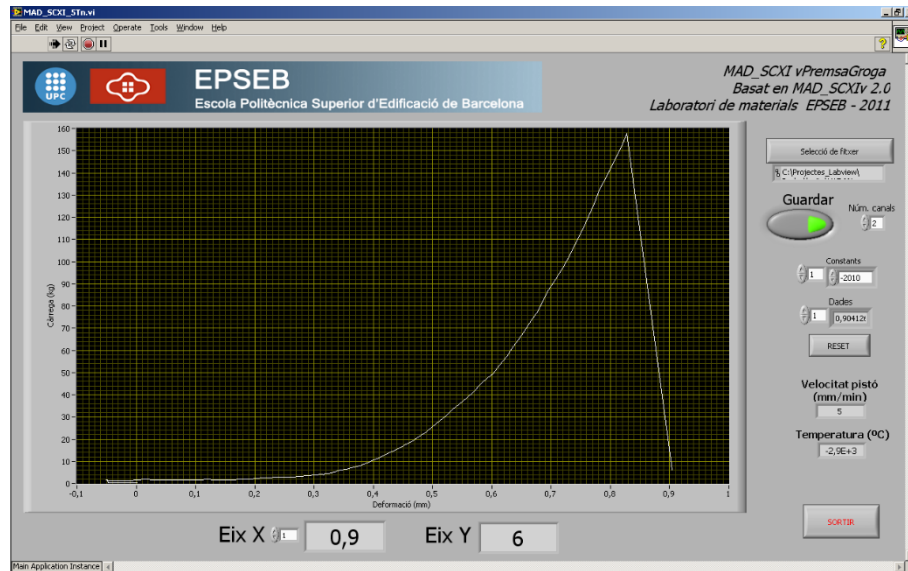
3.2.2 RESISTENCIA A FLEXIÓN

Para hacer los ensayos de la resistencia a flexión se usa la norma ASTM C348 [31]. Este ensayo se hace antes de la de compresión y se usa la misma prensa de 5.000 kg para ejercer la carga (Ilustración 18) y el mismo programa informático (Ilustración 19). Sólo hay dos cosas que varían con el ensayo explicado en el apartado anterior, el accesorio dónde se pone la probeta y la velocidad, esta vez es a 0,7 mm/min.



Ilustración 18. Realización del ensayo a flexión de la probeta 4 x 4 x 16 cm a 0,7 mm/min

Fuente: Elaboración propia



Il·lustració 19. Ejemplo del gráfico de los datos que el programa informático recoge durante el ensayo de la resistencia a flexión

Fuente: Laboratorio de Materiales de la EPSEB

El accesorio que se usa para la flexión consta de dos soportes colocados en la cara inferior y una placa de 6 mm puesta perpendicularmente a la longitud. El punto medio de la placa debe coincidir con el punto medio de la probeta que será dónde se ejercerá la fuerza axial. Este ensayo se considera destructivo.

Todo se hace siguiendo los mismos pasos que en el de resistencia a compresión (ver 3.2.1). En este caso la probeta llegará a romperse en dos trozos al final del ensayo. Las probetas de 4 x 4 x 16 cm que se usan para la resistencia a flexión se han utilizado previamente para los ensayos del MOE_D (ver 3.2.4 y 3.2.5); y posteriormente se usarán para la resistencia a compresión (ver 3.2.1) y la densidad aparente (ver 3.2.7).

3.2.3 MÓDULO ELÁSTICO ESTÁTICO

El módulo elástico estático (MOE_E) viene directamente asociado a propensión a la rotura de la probeta. Éste se obtiene con los datos de la deformación y la carga que ha recopilado el programa informático durante el ensayo a compresión. Se analizarán los datos de los 90 días de curado. Se extrae la pendiente de la curva que corresponderá al MOE_E , los resultados están en kg/mm^2 y se pasarán a MPa.

3.2.4 MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO MEDIANTE LA FRECUENCIA DE ONDAS SONORAS

El ensayo que determina el módulo elástico dinámico (MOE_D) mediante la frecuencia de ondas sonoras se hace siguiendo la norma UNE-EN-ISO 12680-1 [28]. El espécimen que se estudia, ya con la masa determinada y medido con el pie de rey para determinar la densidad, se coloca sobre unos apoyos de poliestireno extruido (cada una a una distancia de 3,60 mm de cada extremo) para evitar distorsiones con posibles vibraciones ajenas. El elemento percutor que se usa para este ensayo tiene la punta de madera.

También se colocará el micrófono, que captará las ondas, cerca de la cara longitudinal (ver Ilustración 20 c) pero sin que entren en contacto. Se necesita un programa informático que analiza la frecuencia de las ondas sonoras para la lectura de los resultados. Las fórmulas usadas para obtener el MOE_D por flexión de la cara 1 (a) y 2 (b) también se encuentran en dicha norma. El MOE_D de la cara longitudinal (c) se ha obtenido mediante la publicación de Vipulanandan [38]. Como se explica en el apartado 3.2.1 con el MOE_E , viene directamente asociado a propensión a la quiebra del mortero.

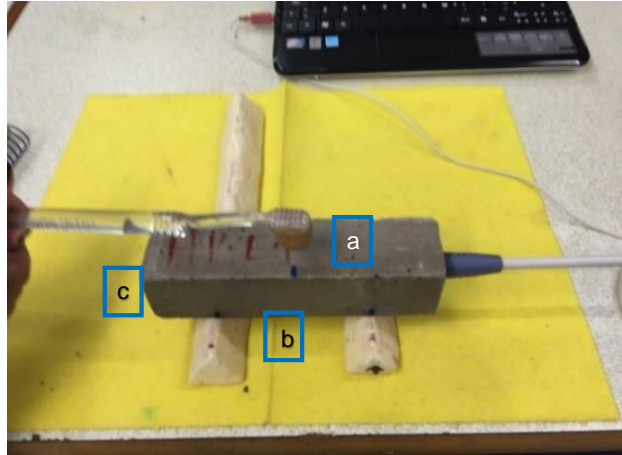


Ilustración 20. Muestra de la recogida de datos del ensayo mediante la frecuencia de ondas sonoras

Fuente: Elaboración propia

- a) Cara 1
- b) Cara 2
- c) Cara longitudinal

Para poder hacer el análisis del MOE_D de las probetas, se hará el promedio de las caras 1 (ver Ilustración 20 a) y 2 (b); se hace porque tienen la misma superficie y distancia al captador del sonido. Y la cara longitudinal (c) se estudiará por separado, ya que la longitud de propagación del sonido es diferente. Al contrario que los ensayos de la resistencia a compresión y flexión, el ensayo de propagación de ondas sonoras se considera un ensayo no destructivo.

3.2.5 MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO MEDIANTE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS

Este ensayo se hace a partir de la UNE-EN-ISO 12504-4 [33]. El MOE_D mediante la velocidad de propagación de ultrasonidos precisa de un equipo de emisión y recepción de ultrasonidos de 55 kHz C372N de *MATEST* (ver Ilustración 21). Los palpadores, uno emisor y otro receptor, se colocan en los extremos de la probeta en el sentido longitudinal para que la transmisión sea directa; se usa un gel que ayuda a la transmisión de los ultrasonidos (de pH neutro que no corrompe el material).

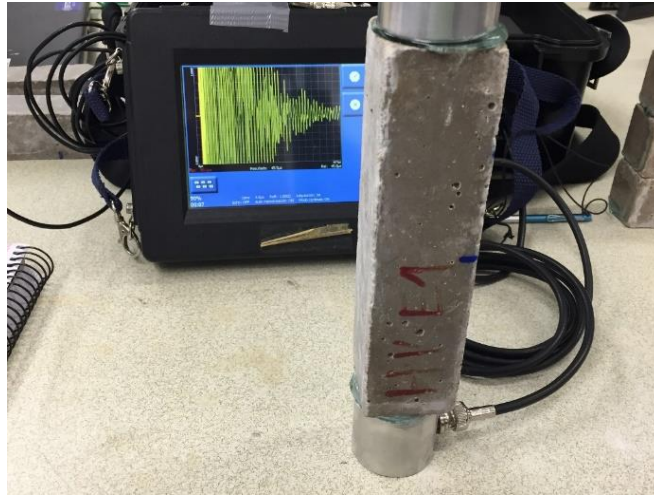


Ilustración 21. Muestra de la recogida de datos para el ensayo de propagación de los ultrasonidos con el C372N de Matest

Fuente: Elaboración propia

3.2.6 RETRACCIÓN POR SECADO

La retracción es la disminución del volumen que padece el mortero durante el fraguado y el endurecimiento [16]. Este fenómeno aumenta cuánto más rico en cemento sea el mortero, más finos tenga y/o cuánto más cantidad de agua haya de pastado. La retracción por secado se produce cuándo al finalizar el fraguado se evapora el agua. El ensayo de retracción se hace siguiendo las normas ASTM C 490 [34] y C 596 [35]. Ésta última con la variación del número de mediciones, en la norma pone que se tienen que hacer cuatro mediciones y se hacen tres para cada mezcla.

El procedimiento es el siguiente: se miden las muestras en dos tipos de ambientes. Los primeros 28 días de curado las probetas se dejan en la cámara húmeda y los 90 días siguientes a la cámara húmeda se dejan en condiciones ambientales del laboratorio. Antes de medir las muestras, se calibra el aparato con el que se compara la variación longitudinal con un testigo de referencia (ver Ilustración 22) que servirá para fijar la lectura inicial.



Ilustración 22. Toma de datos de la referencia para la retracción para establecer la lectura inicial

Fuente: Elaboración propia

Las probetas de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm selladas con parafina sirven para medir la retracción básica y las que no tienen parafina (ver Ilustración 23) para la retracción total. Para obtener la retracción por secado se tiene que calcular la diferencia entre la retracción total y la básica. Para el cálculo de la retracción por secado se cogerán las mediciones que se hacen en las condiciones ambientales del laboratorio.



Ilustración 23. Toma de datos de la retracción de una probeta sin parafina (a) y una sellada con parafina (b)

Fuente: Elaboración propia

3.2.7 DENSIDAD APARENTE Y ABSORCIÓN. ÍNDICE DE POROSIDAD ABIERTA

El ensayo de la densidad aparente, absorción e índice de porosidad se hace usando la norma UNE EN 1015-10 [37], ya que el equipo precisado para el ensayo facilitado por el laboratorio está preparado para realizar el ensayo con la norma UNE.

Las probetas usadas para éste ensayo son la mitad más grande obtenida en el ensayo de resistencia a flexión que no se ha usado para el ensayo de resistencia a compresión. Para este ensayo, se han cortado las piezas por dónde se ha partido en el ensayo a tracción para conseguir una forma de paralelepípedo y lisa por todas sus caras y así conseguir que absorba el agua por igual en todas las caras. La capacidad del equipo de ensayo nos limita a hacer como máximo cuatro muestras diferentes a la vez (cada muestra tiene tres probetas). Es importante separar las piezas entre sí con un lo suficientemente grande para que no interfiera en el contacto del agua con cada muestra. Es fundamental que todas las caras de cada probeta estén en contacto con el agua, así que se pone una especie de red de plástico de 1 mm para que la cara que yace sobre la base del recipiente no toque directamente el receptáculo. Para realizar el ensayo, se precisa de un equipo para realizar el vacío y la introducción del agua destilada, tal y como se muestra en la Ilustración 24.

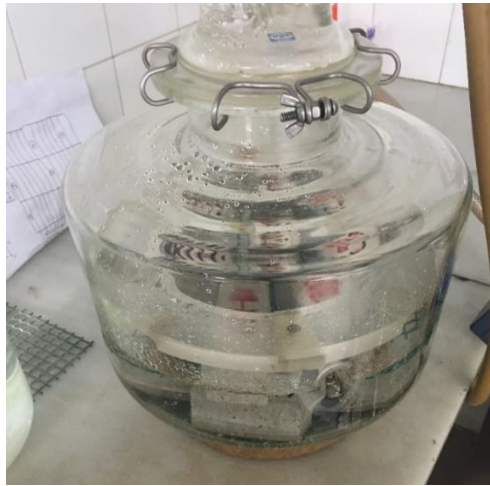


Ilustración 24. Recipiente de vacío para el ensayo de porosidad de las probetas
Fuente: Elaboración propia

Como no se hace el ensayo inmediatamente después de los ensayos de resistencia a compresión, las muestras se dejan en la cámara húmeda hasta que se procede a ensayar; antes del ensayo se secan dentro del horno a 60°C unas 24 horas.

Una vez secadas las muestras, se pesan en una balanza de 500 g con precisión de 0,01g, obteniendo la masa de secado; se van colocando dentro del recipiente de vidrio con cuidado de dejar suficiente espacio entre probetas. Una vez colocadas se procede a cerrar el recipiente y hacerle el vacío durante $2,5 \pm 0,5$ horas. Ya transcurrido ese tiempo se introduce el agua destilada poco a poco hasta tener totalmente sumergidas las probetas y luego se deja cerrado al vacío durante 24 horas más. Con el tiempo de espera cumplido, se sacan las piezas una a una para secar las caras superficiales con un trapo limpio y humedecido y pesarlas, así se obtiene la masa de saturación; una vez pesadas se devuelven al recipiente con agua destilada para que no pierdan la humedad. Por último se pesan las probetas sumergidas en agua destilada para obtener la masa sumergida, tal y como se muestra en la Ilustración 25.



Ilustración 25. Obtención de la masa sumergida en agua de una probeta
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. EXPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente apartado, se presentan los resultados de los ensayos realizados a los morteros de estudio, en estado fresco y endurecido, para la obtención de sus propiedades físicas. Los resultados numéricos se exponen en los Anexos correspondientes.

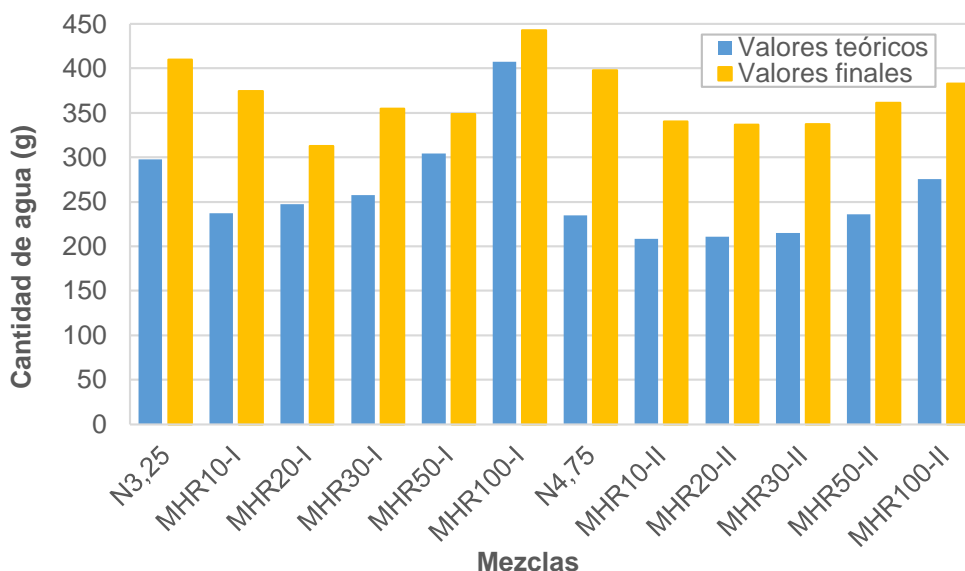
4.1 ENSAYOS DEL MORTERO FRESCO

En el siguiente apartado se analizarán y discutirán los resultados de los morteros en estado fresco: el contenido de agua final de las mezclas, la densidad y el contenido de aire.

4.1.1 ANÁLISIS DE LA CONTENIDO DE AGUA FINAL DE LAS MEZCLAS

En la Figura 3, se presentan los resultados obtenidos de la prueba de consistencia; en este, se puede observar las cantidades de agua necesarias para obtener la consistencia deseada (valores finales) y sus valores iniciales según el cálculo. Los resultados se presentan tanto para el grupo de mezclas MHR-I ($a/c = 3,25$), como para las MHR-II ($a/c = 4,75$) y los morteros de referencia respectivamente (N3,25 y N4,75).

Figura 3. Cantidades de agua teóricos y finales de las mezclas



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 3, la cantidad de agua de cálculo para las mezclas y la real no son las mismas. Eso se debe a que el AHR tiene una absorción elevada (ver Tabla 4) y requiere más cantidad de agua para obtener la consistencia deseada. La relación w/c inicial para todas las mezclas es de 0,5. Esta relación tiene en cuenta que el árido está húmedo a la hora de su uso y en nuestro caso se emplea el material seco. En el agua inicial se tiene en cuenta la absorción de los materiales pero para conseguir un mortero con la consistencia apropiada, según el ensayo explicado en el apartado anterior, se le añade el agua necesaria para alcanzar el diámetro deseado.

Cómo ya se ha explicado en el apartado anterior (ver 3.1.1), los valores del agua final pueden variar bastante si el resultado del ensayo de consistencia se acerca más al límite inferior o al superior. Así que la tendencia clara del incremento de agua según se incrementa el porcentaje de AHR que tienen las dos relaciones, no se ve reflejado en la cantidad final. Este incremento de la cantidad de agua se debe a que el AHR tiene una absorción de agua mayor que el AN.

En la Figura 3 se puede ver que las mezclas de MHR-I requieren de una cantidad inferior de agua que en las MHR-II; esto es debido a que la cantidad de árido en las MHR-II es superior a las MHR-I y cuanto más árido, más necesidad de agua para su absorción y trabajabilidad. También, se observa una diferencia muy clara en la proporción de agua añadida entre una dosificación y la otra, la cantidad añadida en las MHR-II es casi constante en todas las muestras, sin embargo no pasa en las MHR-I.

Finalmente se puede observar que:

- En las MHR-I se percibe que cuánto más porcentaje AHR, menos agua se necesita para conseguir la misma consistencia.
- La necesidad de agua para la consistencia en MHR-II es constante.
- Cuanto más cantidad de árido, más necesaria es la cantidad de agua que se debe añadir para conseguir la misma consistencia.

En muchas publicaciones hablan sobre el agua usada en las mezclas, pero hay casos que hablan del agua inicial (con la relación w/c) y el agua de absorción. En el estudio de Zhao et al. [12] se exponen los valores de agua absorbida del mortero con el árido presaturado 24 horas antes. En él se muestra un aumento constante de la cantidad de agua, llegando a incrementarse, de la mezcla del 50% a la del 100% de AHR, un 57%.

En cambio en estudios como los de Neno et al. [8], Braga et al. [7] o Vegas et al. [11] también se obtienen los valores de agua final a partir de la prueba de consistencia. En la investigación de Neno et al. [8] los resultados están en concordancia con los del presente trabajo, en concreto con los MHR-I, puesto que en este estudio se muestra que la cantidad de agua de amasado va disminuyendo según el porcentaje de AHR va aumentando.

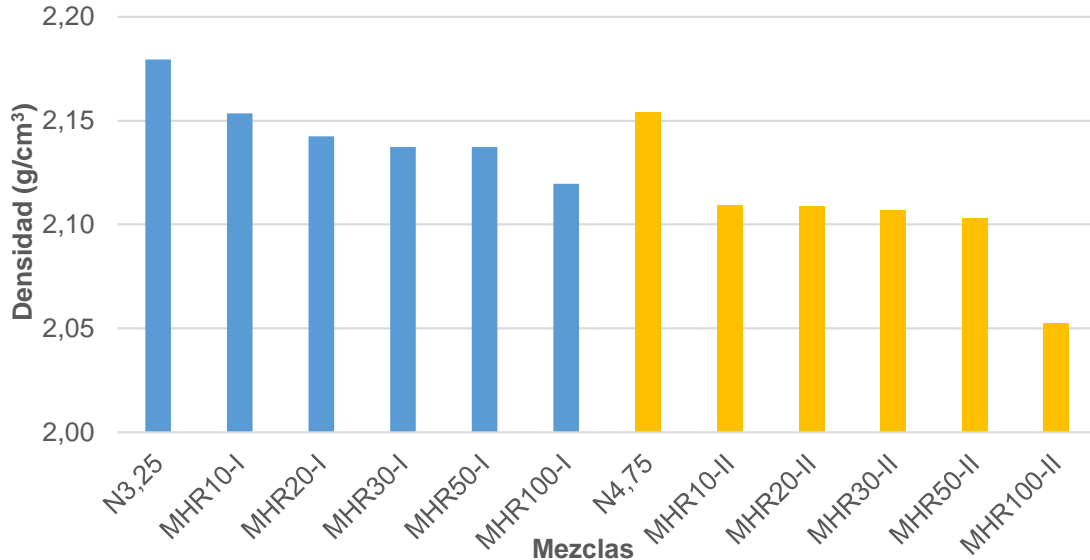
Otra publicación es la de Braga et al. [7]. En ella se usan el 5, 10 y 15% de sustitución del AN con una relación a/c = 4; los resultados muestran que cuánta más cantidad de AHR hay en la mezcla, menos cantidad de agua se necesita para conseguir la misma consistencia, tendencia que también comparte con los MHR-I. Y en comparación con su mortero de referencia AN, el mortero con el 15% de AHR necesita un 17% menos cantidad de agua.

En la investigación de Vegas et al. [11] –con una relación a/c = 10 y unos porcentajes de sustitución de 10, 20, 25, 50, 75 y 100%– la tendencia está en discordancia con el del presente trabajo; cuánta más cantidad de AHR, más agua se necesita para conseguir la misma consistencia; se llega a incrementar un 67% la cantidad de agua del mortero de referencia y el del 100% de AHR.

4.1.2 ANÁLISIS DE LA DENSIDAD

A continuación se analizarán los resultados de la densidad de las diferentes mezclas MHR-I y MHR-II.

Figura 4. Densidades de las mezclas



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se puede observar que las dos relaciones a/c tienen una tendencia semejante, cuánto menos cantidad de AHR en sustitución del AN, mayor es la densidad de la mezcla. Eso es debido a que la densidad del AN es mayor con diferencia a la del AHR; además la forma de los áridos juega un papel importante. El AN tiene un canto redondeado, eso hace que las partículas se acomoden mejor y se creen menos cantidad de poros en su interior. Por el contrario, los MHR son más irregulares y al no acomodarse bien, la porosidad de su interior es más elevada. Y lógicamente, cuánto más porosidad, menos denso.

Si se hace una visión global de los datos de las densidades, se puede decir que:

- Las mezclas MHR-I tienen una densidad media ligeramente mayor que las MHR-II.
- Las primeras tienen 30% menos de árido que las segundas con la misma cantidad de cemento. Así que las partículas del mortero tienen más cohesión entre ellas y en consecuencia, la mezcla es más densa.

Pero hay un publicación, de Zhao et al. [12], en la que usando los mismos porcentajes de sustitución del AN tienen la misma tendencia; cuánto más AHR, más va bajando la densidad. Pero en este caso tiene una variación, la densidad en esta investigación es igual para la muestra de referencia (sin AHR) y la del 10% de AHR y en el presente trabajo hay un salto significativo entre estos mismos porcentajes. Esto puede ser debido a que las densidades de los áridos, AN y AHR, en la publicación de Zhao et al. [12] son bastante similares entre ellos y en cambio en este trabajo están más distanciados.

Así que esta pequeña diferencia de densidades de los áridos en la publicación de Zhao et al. [12] se ve reflejada entre la referencia y el 100% de AHR habiendo una diferencia de 9%. En cambio en el actual trabajo, esta diferencia (cogiendo la más significativa) solamente es del 5%. En este mismo artículo [12] hay que tener en cuenta que la relación que usa para dosificar es el $w/c = 0,5$ y no usando el árido (aunque según los datos facilitados en el artículo, la relación es aproximadamente de $a/c = 3$).

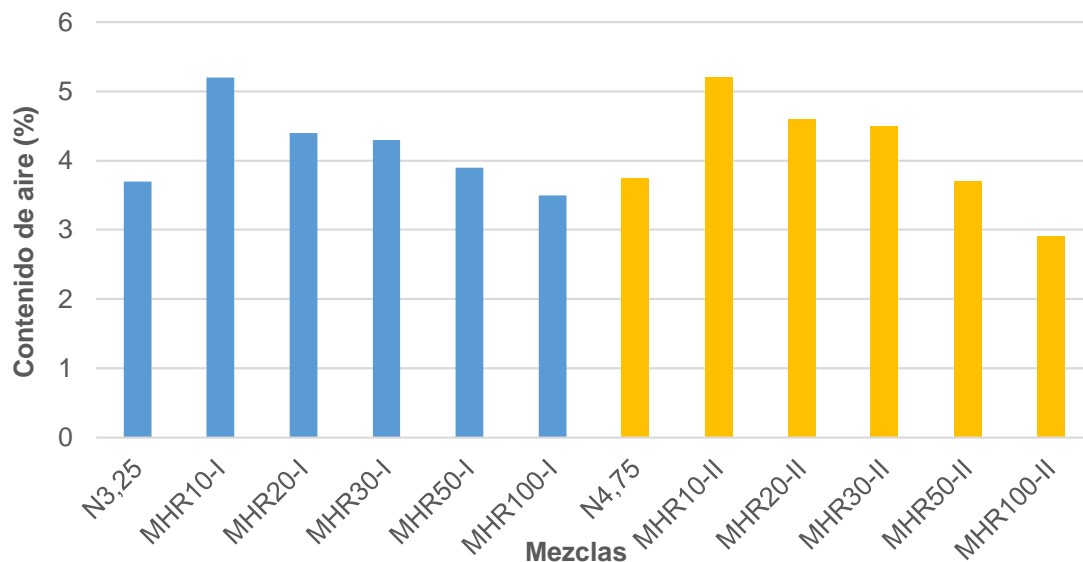
Otra investigación que comparte tendencia con este trabajo es el de Vegas et al. [11]; así que comparando los resultados que obtiene de los morteros con porcentaje de sustitución del árido y la muestra de referencia de AN, se observa que el espécimen con el 100% de AHR es un 23% menor que el de su referencia.

En la publicación de Braga et al. [7] en cambio, se observa un comportamiento que contrasta con los resultados del presente trabajo; en ésta se usa una relación $a/c = 4$ y unos porcentajes de sustitución del 5, 10 y 15%. La densidad de los morteros va aumentado según se incrementa el porcentaje de AHR, siendo el 15% de AHR un 3% mayor que el de referencia.

4.1.3 ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE AIRE OCLUÍDO

Los resultados del ensayo para obtener el contenido de aire están representados en la Figura 5

Figura 5. Resultados del contenido de aire de las mezclas



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5 se representan los resultados de contenido de aire reportados por las muestras, y de forma general se observa que estos se encuentran con valores de entre el 2,9 al 5,2%. Los valores de las probetas de relación $a/c = 3,25$ tienen una tendencia similar a los de relación $a/c = 4,75$; cuánto más AHR contienen, menor es su contenido de aire.

Las dos relaciones a/c presentan similar comportamiento en el paso de las mezclas con 100% de AN a las del 10% de AHR en sustitución; se eleva el contenido de aire hasta un 1,5% en los MHR10. Este resultado también puede ser debido a la forma del árido.

Al sustituir solamente un 10% de AN por un 10% de AHR, los áridos gruesos de hormigón no llegan a acomodarse bien en los espacios que han dejado los áridos naturales sustituidos. Ese hecho hace que se formen más vacíos en la mezcla. Así que cuando se va aumentando el porcentaje de AHR, el material se va acomodando mejor; en este caso, está el MHR50-II que tiene un contenido muy semejante con el N4,75. Según los resultados, los morteros que presentan un contenido de aire parecido al del testigo, son el MHR100-I y MHR50-II.

Se puede decir que:

- Los resultados son correlativos pero no varían mucho los porcentajes.
- Se pueden comparar las mezclas de referencia y MHR100, aunque la geometría del árido machacado es más angulosa e irregular que los de AN (de canto más bien redondeado) se puede presuponer que la cantidad de aire de las mezclas con mayor cantidad de AHR es más elevada que las de natural.
- La forma del AN hace que el mortero se compacte mejor evitando huecos entre el árido más grueso. Pero en este trabajo resulta concluir lo contrario.
- Al ser datos que no tienen un margen sustancial entre ellos, no se puede decir que esta afirmación sea totalmente aceptada.

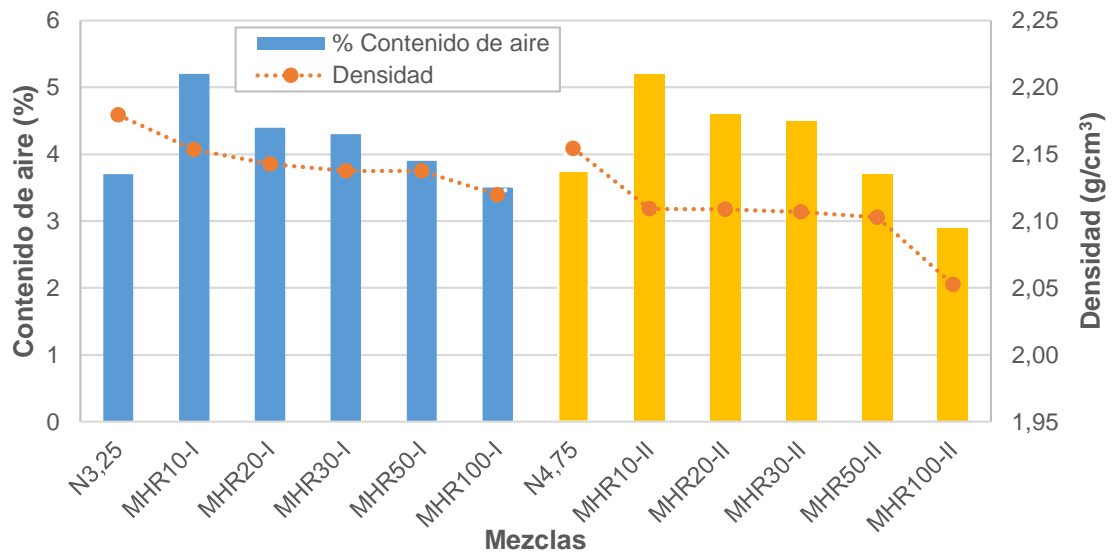
En la investigación de Sanabria et al. [2], con porcentajes del 50, 80, 90 y 100% de sustitución, se hacen morteros con AHR procedentes de dos circuitos de trituración diferentes, c1 (AHRc1) y c2 (AHRc2), para poder comparar sus comportamientos. En el mortero con árido AHRc2 se observa una tendencia similar a la de este trabajo, cuanto más cantidad de AHR, menos contenido de aire. De la muestra con el 50% y el 100% de AHRc2 hay un 1,4% de diferencia, mientras en este trabajo (para los mismos porcentajes de AHR) esta diferencia es del 0,02% en MHR-I y del 0,6% en MHR-II.

Por el contrario se observan los resultados del mortero con AHRc1 tienen una tendencia totalmente contraria a la del presente trabajo; cuánto más porcentaje de AHR, más es el contenido de aire.

En el estudio presentado por Caballero et al. [2] presenta la misma tendencia, además de valores muy similares, con un mínimo de 4,1% y un máximo de 5,5%; en los dos coincide que el valor máximo es 5,2% y se produce en las mezclas con el 10% de AHR.

4.1.4 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD Y EL CONTENIDO DEL AIRE

Ya analizada la densidad y el contenido de aire ocluido por separado se procede a relacionar los dos ensayos anteriores para encontrar la explicación general de los resultados (ver Figura 6).

Figura 6. Relación entre el contenido de aire y la densidad en estado fresco

Fuente: Elaboración propia

La teoría dice que cuánto más densidad para el mismo volumen, menos contenido de aire. Como se muestra en la Figura 6, esto se cumple para las todas las muestras menos en MHR100-I. En el espécimen con el 10% de AHR se ve un resultado razonable, la densidad baja pero el contenido de aire sube. Pero en el resto la densidad se mantiene casi constante (menos en las mezclas con el 100% de AHR) ya que la densidad aparente SSD de los dos áridos son muy semejantes; pero el contenido de aire va disminuyendo según se incrementa el porcentaje de AHR.

Eso hace pensar cuál puede ser la o las posibles causas, así que se observan las más probables: la cantidad de agua, la forma del árido y/o el contenido de partículas finas menores a 0,075 mm. La cantidad de agua es importante porque cuánta más cantidad de agua se añada para la trabajabilidad, más huecos se pueden ocasionar; en este caso, las mezclas con el 100% de AHR son las que tienen más cantidad de agua final pero igualmente el contenido de aire ha disminuido, por tanto queda descartado. Como ya sea dicho anteriormente, la morfología del AHR hace que se creen más poros, sin embargo en este trabajo pasa todo lo contrario, cuánto más porcentaje de AHR, menos contenido de aire. Por último sólo nos queda analizar la repercusión de la cantidad de finos que contienen los áridos. El porcentaje del AHR es un 3% mayor, es decir, que la capacidad de finos del AN el casi la mitad, eso significa que estas partículas finas son capaces de ocupar los huecos provocados por los áridos más gruesos.

Estas observaciones no están de acuerdo con las explicaciones expresadas anteriormente; así que con el análisis de los dos ensayos relacionados se puede aclarar que los comentarios de los ensayos por separado que esté en desacuerdo con lo expresado a continuación quedan revocados.

Finalmente con el análisis de la relación entre la densidad en fresco y el contenido de aire ocluido se contemplan los siguientes aspectos:

- La causa del descenso del contenido de aire se debe a la cantidad de partículas finas que contiene el AHR.

- La morfología de los áridos ni la cantidad de agua final son las causantes directas del resultado obtenido.
- La densidad no viene directamente asociada al contenido de aire ocluido; la cantidad de finos del AHR es considerable, lo cual permite llegar a ocupar los huecos que se forman por la morfología del árido, así que cuánto más proporción de AHR, menos contenido de aire.

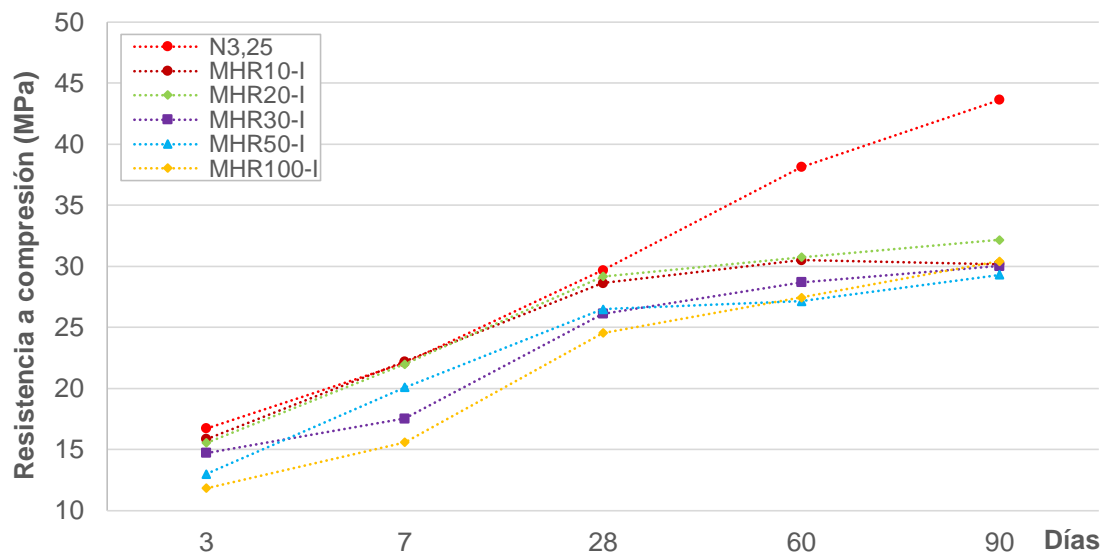
4.2 ENSAYOS DEL MORTERO ENDURECIDO

En el siguiente apartado se analizarán y discutirán los resultados de los morteros en estado endurecido: resistencia a compresión y flexión, módulo elástico estático y dinámico y densidad aparente.

4.2.1 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

A continuación se analizarán los resultados de la resistencia a compresión; estos datos provienen de la carga máxima obtenida con los datos de la curva de carga/tensión, ésta indica el punto de rotura de la probeta; el valor se consigue en kg, para transformarla en MPa se usa la fórmula facilitada en la norma ASTM C349 [26].

Figura 7. Resultados del ensayo a compresión de las probetas a/c = 3,25 en MPa



Fuente: Elaboración propia

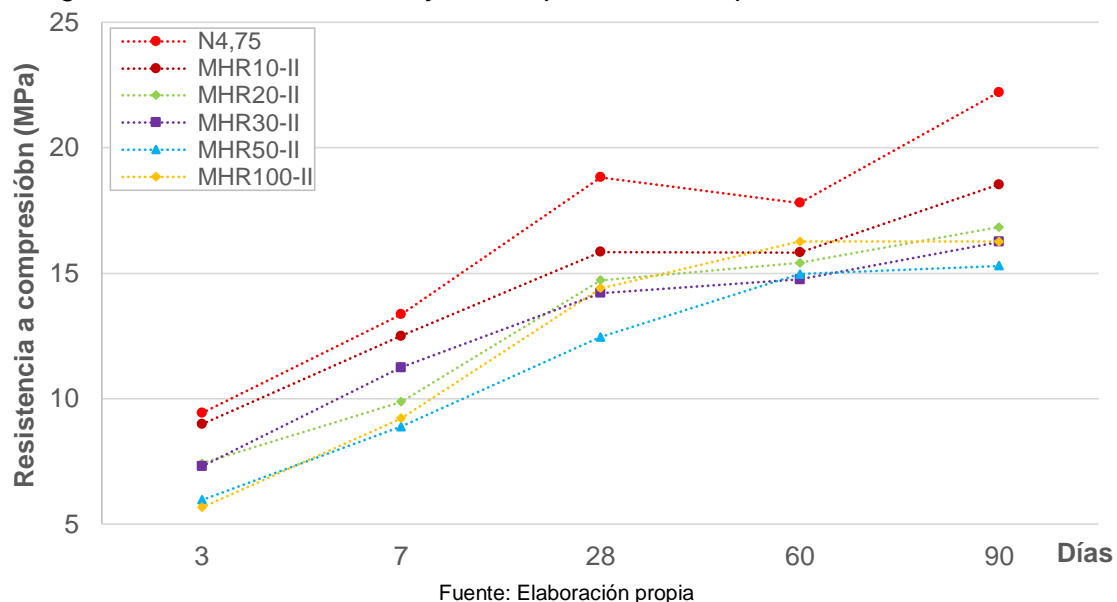
En la Figura 7 se percibe que la compresión aumenta en todas las muestras con el paso del tiempo. La muestra testigo N3,25 tiene un crecimiento más uniforme que en el resto. Se puede observar que hasta los 28 días, en todas las muestra MHR-I, la resistencia a compresión aumenta con una pendiente más pronunciada (muy similar a la de N3,25) que a los 60 y 90 días.

Pero lo más significativo es que la resistencia a 90 días de los MHR-I acaban teniendo unos valores mucho más cercanos entre ellos que a los tres días, mostrando así que a los 90 días estas muestras acaban trabajando casi por igual (indiferentemente del porcentaje de AHR usado). Pero eso sí, éstos valores están muy por debajo de la muestra N3,25 con una diferencia de unos 10 MPa.

Si sólo se estudiara las muestras hasta los 28 días, cómo es habitual, se podría decir que las muestras del 10% y del 20% podrían trabajar cómo el N3,25 ya que tienen las resistencias muy parecidos. Pero gracias a seguir analizando hasta los 90 días se ve que a partir de los 28 días de curado el aumento de la resistencia ya no tiene el mismo ritmo que la muestra testigo (que sigue aumentando su valor a la misma constancia hasta los 90 días).

La probeta con el 20% tiene la resistencia ligeramente más elevada, así que se escogería entre las muestras MHR-I, pero al tener unos resultados con las diferencias tan ajustadas, no se puede decir que la elección sea definitiva.

Figura 8. Resultados del ensayo a compresión de las probetas $a/c = 4,75$ en MPa



En la Figura 8 se puede observar que la resistencia a compresión también aumenta en todas las muestras según pasan los días de curación. Este aumento en la probeta del 50% es mucho más uniforme que en el resto de MHR. Si se coge como referencia la muestra testigo, se puede percibir que el 10 y el 30% tienen un comportamiento paralelo a éste pero con unos valores inferiores.

Si se observan los resultados de las probetas a los 60 días, la muestra testigo N4,75 tiene una leve disminución; fenómeno que pasa también en el 10%. El resto de muestras siguen aumentando; el 50 y el 100% con una pendiente más pronunciada y el 20 y 30% mucho más moderada. Cómo pasa en la resistencia a compresión con la relación $a/c = 3,25$, si sólo se estudiara hasta los 28 días se podría pensar que el incremento hasta los 90 días seguiría constante, tal y como hace para 3, 7 y 28. Pero como se puede ver, no es así; por ejemplo, si se coge la pendiente media entre los tres primeros puntos, el valor de N4,75 a los 90 días sería un 27% mayor al que actualmente es.

Eso pasa porque, cómo en el caso de los MHR-I, el crecimiento de la resistencia a compresión a partir de los 28 días se ralentiza.

En cuanto los resultados a los 90 días se observa que N4,75 tiene un 27% más de resistencia que la media de los valores de las probetas MHR-II sin contar el 10%, ya que cómo despunta no se tiene en cuenta en grupo sino que lo hace por sí sólo; el 10% muestra que tiene mejor comportamiento a compresión siendo solamente un 17% menor que la muestra de referencia.

Así que si se tuviera que escoger una probeta sería la del 10% porque tiene un 13% más de resistencia que la media del resto de probetas MHR-II.

Si se compara las dos relaciones a/c se puede observar que:

- La resistencia a compresión media de MHR-I es casi el doble que la de MHR-II.
- En las dos relaciones a/c, a partir de los 28 días, el aumento de la resistencia se ralentiza.
- Ninguna probeta se acerca a la resistencia a compresión a los 90 días de la correspondiente probeta de referencia.
- El uso del AHR no mejora la resistencia a compresión de los morteros de AN.

La resistencia a compresión es un aspecto que los autores principalmente estudian, así que sería interesante la comparación de los resultados con algunos de ellos. Uno de las investigaciones con el que se podrían comparar es el de Sanabria et al. [2]. En él se usan el 50, 80, 90 y 100% de AHR y se hacen los ensayos a 7 y 28 días. Respecto a los dos tipos de muestras que hace, una con AHRc1 y la otra con AHRc2 (según el tipo de molienda), tienen una tendencia similar; cuánta más cantidad de AHR, menor es la resistencia a compresión. La diferencia a los 7 días entre la probeta con el 50% AHR y la del 100% del AHRc1 es de 73% y del 59% para AHRc2 siendo, en los ambos casos, el 50% AHR el que tiene mayor valor. En cuando a los 28 días, esta diferencia se incrementa hasta los 78 y 65% respectivamente. Así que concluye que los morteros con AHR no mejoran la resistencia de los morteros convencionales, como pasa en el presente trabajo.

Otra línea de investigación en el que hay un comportamiento parecido al presente trabajo es el de Zhao et al. [12] –con los mismos porcentajes de reemplazamiento del AN y solo a 28 días– se expone que la resistencia va decreciendo según se aumenta el porcentaje de AHR; como resultado se obtiene que el valor más cercano al mortero de referencia es la probeta con el 10% de AHR con tan solo un 1,6% de resistencia menos; y por el contrario, la probeta que muestra más debilidad es la del 100% AHR con un 62% menos de capacidad resistente.

En el estudio de Vegas et al. [11], aunque se use una relación a/c = 10 y se ensaye a 7 y 28 días, se puede comparar los comportamientos con el presente trabajo. En este caso comparten tendencia ya que a medida que se aumenta el porcentaje de AHR, se disminuye la capacidad resistente; llegando a disminuir un 75% la resistencia a compresión del mortero de referencia con el mortero íntegramente de AHR.

En la investigación de Cabrera et al. [9], utiliza las relaciones a/c = 4 y 5, relaciones muy cercanas a los MHR-II; los ensayos se hacen a los 7, 28 y 60 días de curación; aunque no usa probetas con porcentajes de AHR intermedios, sí que todas las muestras tienen un 100% de AHR; así que los comportamientos se podrían comparar con MHR100-II.

La resistencia a compresión en este artículo es menor a los resultados del MHR100-II; el incremento de la resistencia a compresión a los 60 días es del 31% para $a/c = 4$ y del 29% para $a/c = 5$. Mientras que de MHR100-II es del 57% (a los mismos días).

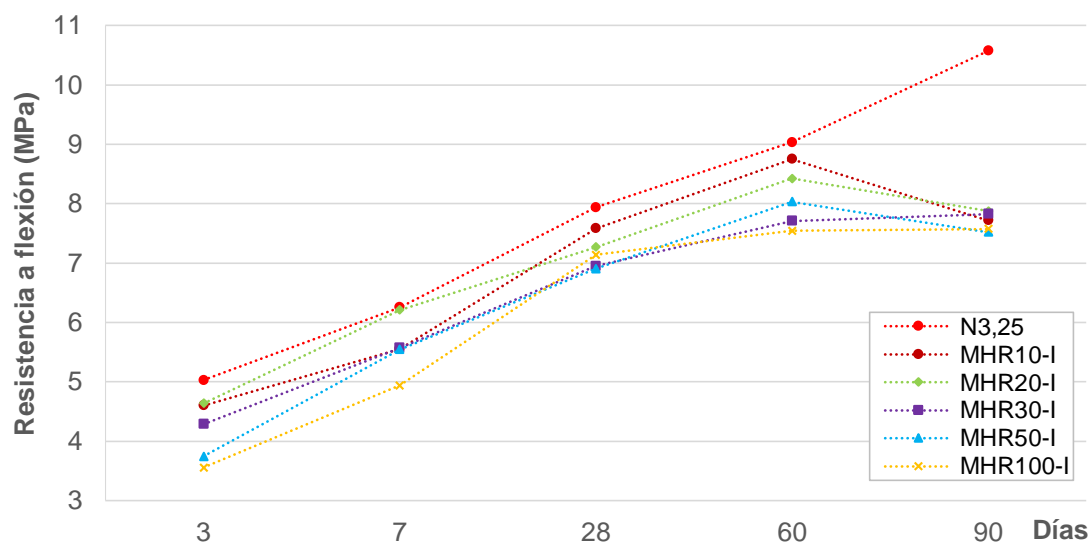
Otro trabajo con el que se puede hacer una comparación es el de Neno [8]; en este artículo se usa una relación $a/c = 4$ y unos porcentajes de sustitución del AHR de 0, 20, 50 y 100%. El ensayo se hace únicamente a los 28 días de curación y solo compara los resultados según el porcentaje de AHR. En su caso, la probeta de referencia (0% AHR) tiene el valor mínimo y el máximo lo obtiene la probeta con el 100% (con un 53% más que el de referencia); el 20 y el 50% –teniendo unos valores semejantes entre ellos– tienen una resistencia 29% menor que el máximo. Sus resultados son antológicos a los de este trabajo, ya que en su conclusión la resistencia a compresión aumenta según el porcentaje de AHR se incrementa.

Otra investigación con resultados opuestos al del presenta trabajo es la de Braga et al. [7]; se observa que, haciendo el ensayo a los 28 días, se obtiene la tendencia contraria. En su caso la capacidad resistente del mortero de referencia llega a incrementarse un 220% con el mortero íntegramente de AHR.

4.2.2 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN

A continuación se analizan los resultados de la resistencia a flexión hasta los 90 días; igual que en la resistencia a compresión (ver apartado 4.2.1), los resultados obtenidos están en kg y se transformarán en MPa según la fórmula que facilita la ASTM C348 [31].

Figura 9. Resultados del ensayo a flexión de las probetas $a/c = 3,25$ en MPa

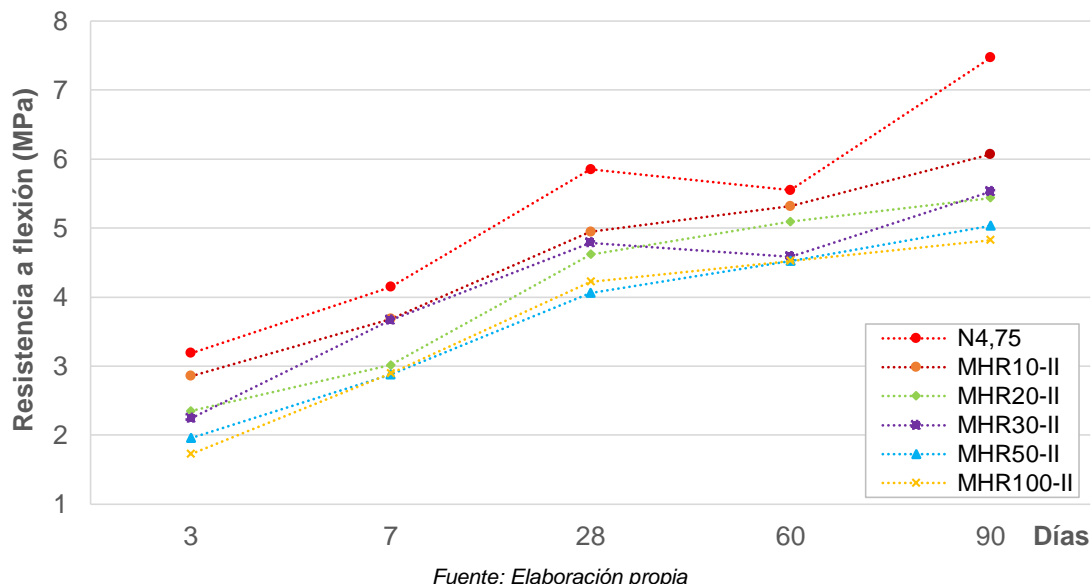


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9 se observa que la resistencia a flexión de todas las probetas aumenta de forma uniforme hasta los 60 días; un fenómeno revelador es que a partir de los 60 días de curado las muestras con AHR –menos la que contiene el 30% que tiene un leve aumento y 100% que se mantiene– tienen un decrecimiento inquietante. La probeta con el 10% a 90 días, con la bajada más significativa, el valor alcanzado a los 60 días llega a caer hasta un 13,5%.

A los 7 días la probeta del 20% llega a tener el mismo valor que N3,25, ya que hay tan poca distancia entre la muestra testigo y las probetas con el porcentaje de árido AHR menor del 20%. Los valores de MHR-I a los 90 días llegan a ser muy similares (comprendidos entre 7,5 a 8 MPa). Esto es un fenómeno que se ha podido apreciar también en la compresión de las mismas probetas. La diferencia que hay entre las probetas con AHR y la probeta testigo N3,25 a los 90 días llega a ser un 27% al promedio de los MHR. Una vez más, si sólo se estudiaran las probetas hasta los 28 días, no se podría observar este hecho.

Figura 10. Resultados del ensayo a flexión de las probetas $a/c = 4,75$ en MPa



En cambio en la Figura 10 hay un crecimiento de los valores hasta los 90 días. La probeta con AHR que tiene un mejor resultado es del 10%, aunque igualmente tiene un valor 19% menor que N4,75. La resistencia de la probeta con el 30% sigue un comportamiento paralelo a N4,75 pero la distancia a los 90 días se ensancha hasta el 26%.

En resumen:

- Aunque los valores de la relación $a/c = 3,25$ sean muy próximos entre ellos y haya un decrecimiento de los 60 a los 90 días sigue teniendo una resistencia a flexión superior.
- El mortero más resistente de MHR-I (30% de AHR) es un 22% mayor al MHR-II más resistente (10%)
- El AHR no mejora la resistencia a flexión de los morteros convencionales.

Tal y como se ha hecho para la resistencia a compresión (ver 3.2.1) se procederá a comparar los resultados con las mismas investigaciones, en caso de que se haya estudiado también la resistencia a flexión, como hacen Zhao et al. [12], Vegas et al. [11], Cabrera et al. [9] o Neno et al. [8].

En el caso de la investigación de Zhao et al. [12], la tendencia que mostraba la resistencia a compresión también se encamina en la flexión; a mayor cantidad de AHR sustituido, menos resistente.

Lo que sí se obtiene en este artículo es que la resistencia de la probeta con el 10% de AHR supera por un 7% a la muestra de referencia, dando un mejor comportamiento a flexión; en cuánto la diferencia entre la probeta con mejor comportamiento (10% de AHR) y la que menos resistencia tiene (100% de AHR) es del 35%.

Otra línea de investigación con una tendencia parecida a la del presente trabajo es la de Vegas et al. [11], aunque la relación a/c sea tan diferente, se obtiene el mismo comportamiento; cuánta más cantidad de AHR menos resistencia a flexión. La capacidad resistente del mortero de referencia llega a disminuirse hasta cinco veces su valor en el mortero íntegramente con AHR.

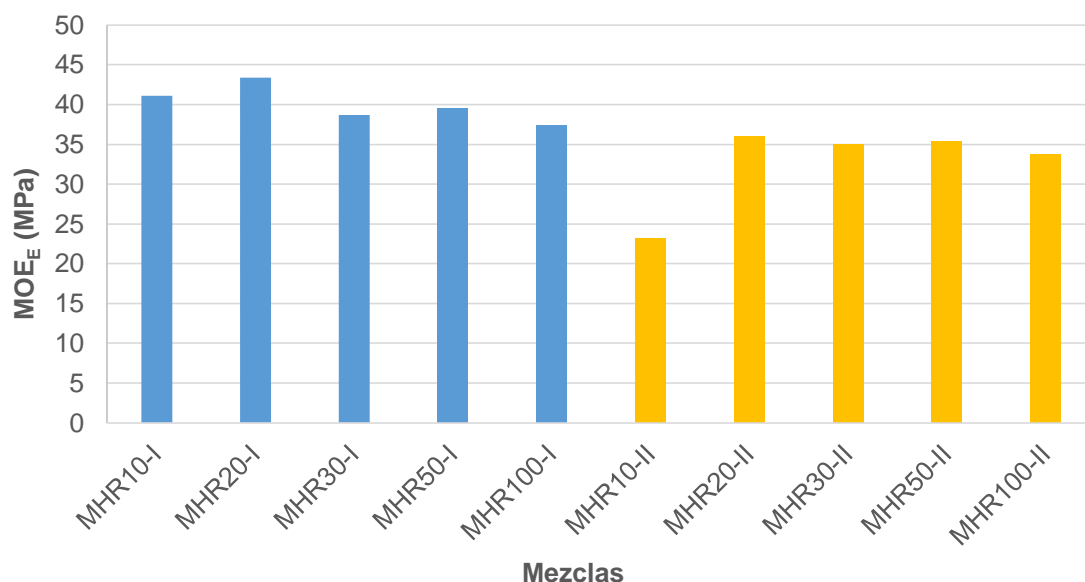
En el estudio de Cabrera et al. [7], la resistencia a flexión de la relación a/c = 4 es muy cercana a MHR100-II a los 7 días, siendo MHR100-II un 11% superior. Pero a los 60 días esta distancia se incrementa hasta el 22%. Lo singular es que la relación a/c = 5 debería tener los valores más cercanos a MHR100-II pero es un 35% menor a los 7 días y 45% a los 60 días.

Y por último en el caso de Neno et al. [8], tal y como pasa en la compresión, también se mejoran las resistencias a flexión a los 28 días; aunque las probetas tengan unas resistencias mejores que la muestra de mortero referencia con AN, el conducta de las probetas según los porcentajes muestra que el mortero con el 50% de AHR tiene una resistencia un 12% menor a la del 20%; aunque igualmente es el espécimen con el 100% de AHR el que más resistencia presenta con un 13% más que el resultado subsecuente, la probeta con el 20% de AHR.

4.2.3 ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO ESTÁTICO

En el Figura 11 se presentan los resultados obtenidos del MOE_E a partir de la pendiente de la curva carga/deformación. Los resultados se obtienen en kg y se convertirán a MPa.

Figura 11. Resultados del MOE_E de las probetas MHR-I y MHR-II en función de la deformación a los 90 días en MPa



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se observa que las muestras MHR-I tienen valores ligeramente superiores a los MHR-II. Pero eso no significa que tengan una carga máxima mayor. Sólo evidencia que necesita una carga más elevada para deformar un mm, es decir, que la curva carga/deformación es más pronunciada y eso representa una rotura más brusca. La probeta con el MOE_E más elevado es 43,42 MPa de MHR20-I y la más baja, con un 34% menos que el promedio de las probetas MHR-II, es MHR10-II con un MOE_E de 23,13 MPa; según los resultados obtenidos, se escogería MHR10-II como la menos propensa a romperse de forma repentina.

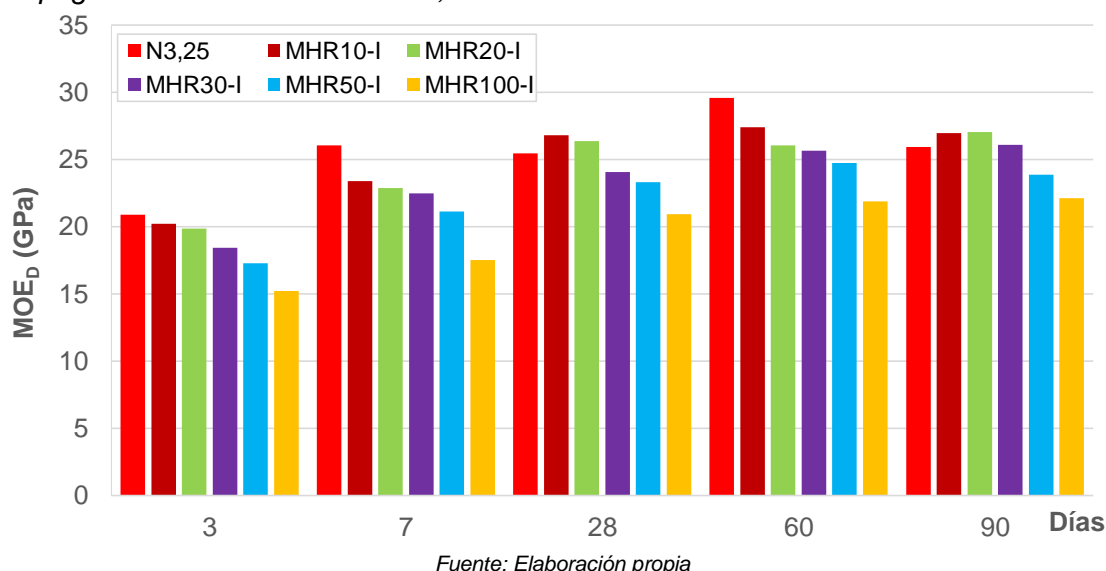
En conclusión:

- Las probetas con mayor cantidad de árido tienen un MOE_E levemente mejor.
- Aunque MHR10-II tenga casi la mitad de resistencia a compresión que el promedio de MHR-I, es el que mejor comportamiento tiene para el MOE_E y el más dúctil.
- Por consiguiente MHR20-I que tuvo el mejor comportamiento en el ensayo a compresión, es el que peor conducta tiene para el MOE_E y es el más frágil.

4.2.4 ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO MEDIANTE LA FRECUENCIA DE ONDAS SONORAS

A continuación se mostrarán los resultados resultantes obtenidos del MOE_D mediante la frecuencia de ondas sonoras. Se analizarán las caras 1 y 2 haciendo el promedio y la cara longitudinal se observará separadamente.

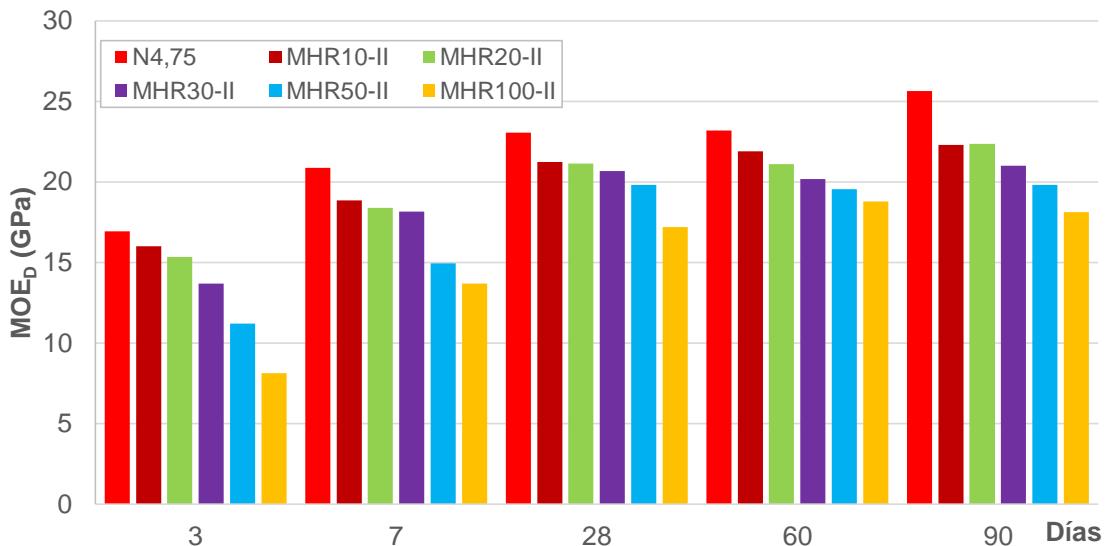
Figura 12. Resultados del promedio de las caras 1 y 2 de MOE_D por flexión para propagación del sonido de $a/c = 3,25$ en GPa



En la Figura 12 se puede observar a simple vista que la tendencia de los objetos de investigación tienen es la misma, cuánta más cantidad de AHR más dúctil. El MOE_D va aumentando hasta los 28 días, dónde comienzan a estabilizarse los valores. Si se comparan los resultados de MHR-I con la muestra de referencia se puede advertir que la probeta con el 100% de AHR tiene mejor comportamiento, es más dúctil. Mientras que las del 10 y el 20% son las que peor conducta tienen y en consecuencia son las más frágiles.

Este fenómeno no está directamente asociado con la resistencia a flexión sino que puede estar relacionado con el contenido de aire del mortero (ver 4.1.3); cuánta más porosidad en el interior de las probetas, mejor se propagan las ondas sonoras y también más rápido. La probeta que tiene un comportamiento semejante N3,25 es la del 50 a los 90 días.

Figura 13. Resultados del promedio de las caras 1 y 2 de MOE_D por flexión para propagación del sonido de $a/c = 4,75$ en GPa



Fuente: Elaboración propia

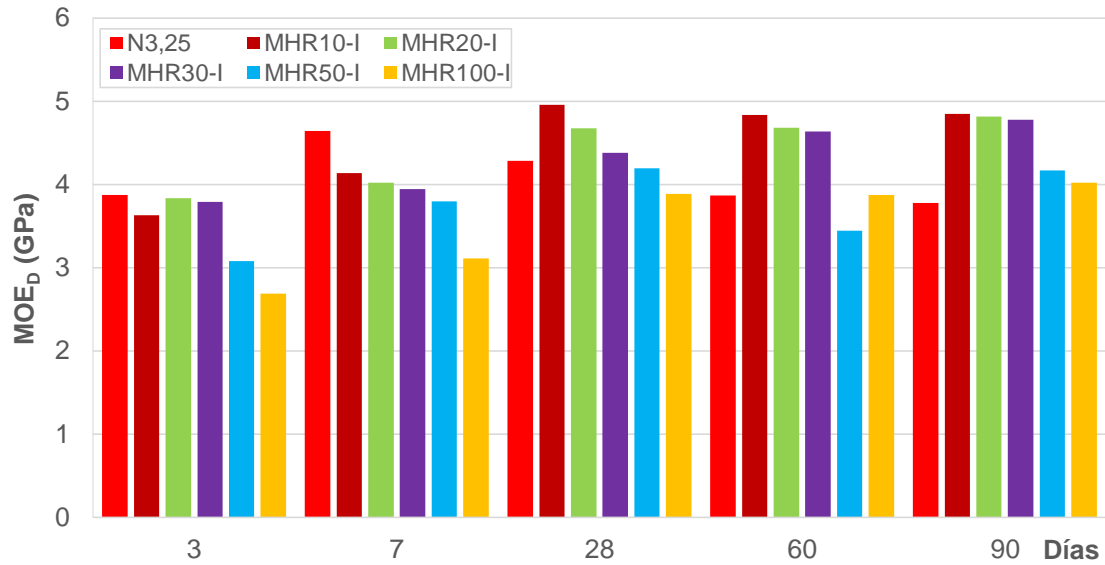
En la Figura 13 se observa el mismo comportamiento que para la relación $a/c = 3,25$, cuánto más cantidad de AHR menor módulo elástico y en consecuencia más dúctil es la probeta; en este caso también se estabiliza a los 28 días; la diferencia está en que la muestra de referencia N4,75 está por encima de los MHR-II y además los valores están un 20% por debajo que los MHR-I; las causas de esta bajada pueden ser debidas a que la cantidad de árido es mayor y que el contenido de aire es menor que las de $a/c = 3,25$. Así que en general, estos especímenes tienen un mejor comportamiento que la probeta testigo. El ejemplar más dúctil también es el 100% y los más frágiles el 10 y 20%.

Si se comparan las dos relaciones a/c se puede concluir que:

- Cuánto más porcentaje de AHR, mejor MOE_D y en consecuencia, menos frágiles.
- Las probetas a los 28 días se estabilizan.
- Las probetas con mejor comportamiento son las que contienen el 100% de AHR.
- Las probetas MHR-I y MHR-II que contienen menos del 20% son las que tienen el MOE_D más elevado y son menos dúctiles.
- Las probetas MHR-II mejoran el comportamiento de la muestra de referencia.

En el trabajo de Neno et al. [8] hace la comparativa de la muestra de referencia (100% AN) y una muestra con el 20% de AHR a los 28 días de curación. Su resultado muestra que la referencia es un 14% menor que a la probeta con AHR. Este fenómeno también ocurre en este presente trabajo, ya que para las MHR-I no se llega a obtener un buen resultado hasta el uso del 50% de AHR.

Figura 14. Resultados de MOE_D para propagación del sonido de la cara longitudinal de a/c: 1/3,25 en GPa

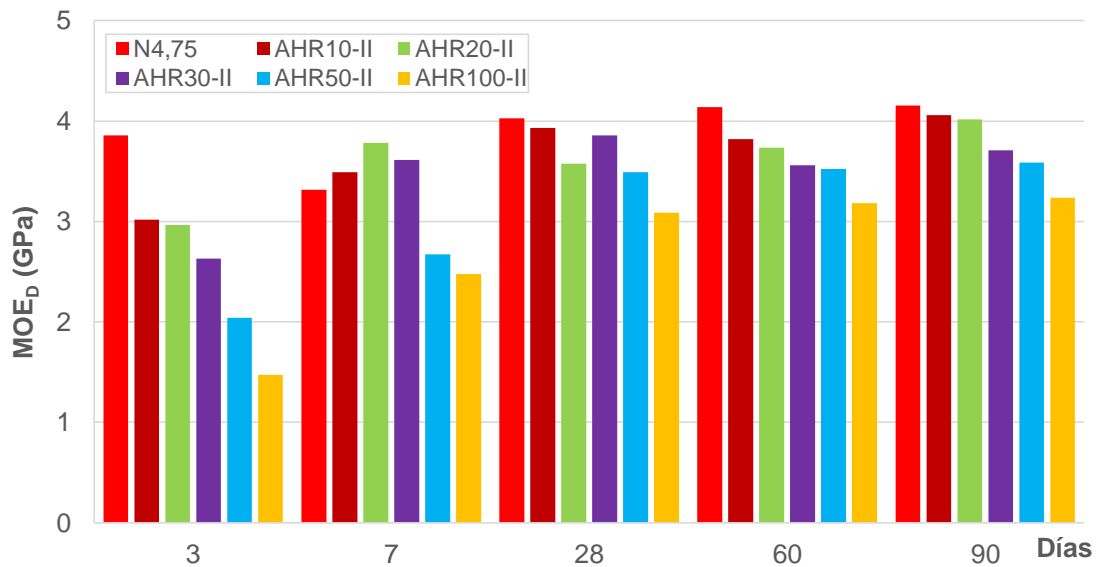


Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 14, cuándo más porcentaje de AHR menos MOE_D tiene; pero hay casos (como el del 10% a los 3 días y el 50% a los 60 días) en que este hecho no se cumple, la causa puede ser debida a un error de lectura del resultado ya que la tendencia está marcada por el resto de días de curado.

En la cara longitudinal también pasa como el MOE_D por flexión de las caras 1 y 2, la probeta con el 100% de AHR tiene el resultado más aceptable de los MHR-I; aunque si se compara con la muestra de referencia, el 100% de AHR es un 6% mayor que N3,25 a los 90 días. En cambio, las probetas MHR-I con un porcentaje menor al 30% tienen un MOE_D un 26% mayor a la referencia con el mismo tiempo de curado.

Figura 15. Resultados de MOE_D para propagación del sonido de la cara longitudinal de a/c: 1/4,75 en GPa



Fuente: Elaboración propia

En el caso de las muestras que se presentan en la Figura 15 se afirma el mismo comportamiento que en todas las probetas anteriores, a más porcentaje de AHR menor MOE_D ; además también se estabilizan a los 28 días. Como ha pasado en las MHR-I hay algunos datos que tienen una conducta diferente debido a errores de lectura, éstos son el 10% a los 7 días y el del 30% a los 28 días. El resto de probetas tienen el comportamiento razonable, acorde con lo dicho en los apartados anteriores. En comparación con el espécimen N4,75, a diferencia de lo que pasa con los MHR-I, hasta los 28 días las probetas con el 30% de AHR o menos tienen un MOE_D más elevado.

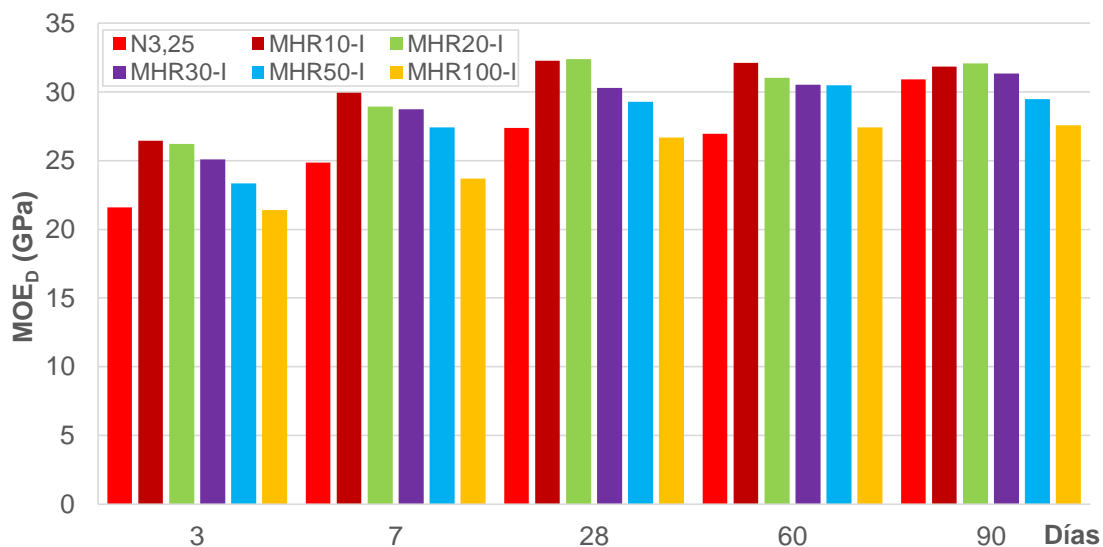
Con los resultados del MOE_D por propagación de ondas para el sentido longitudinal del a probeta se puede observar que:

- Con el mayor porcentaje de AHR, menos MOE_D .
- Los valores se estabilizan a los 28 días.
- Acorde con las dos relaciones a/c, las probetas con el 100% tienen un mejor comportamiento que las muestras de referencia correspondientes.
- A los 90 días, para los especímenes MHR-I, las muestras con un 50% o más son más dúctiles que N3,25; a diferencia de MHR-II que, a partir de los 28 días, todas las muestras presentan un MOE_D menor que N4,75.
- Hay más posibles errores de lectura que en el MOE_D por flexión de la cara 1 y 2, posiblemente por la distancia que las ondas tienen que recorrer es mayor.

4.2.5 ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO MEDIANTE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS

En este apartado se analizan los resultados del MOE_D mediante los ultrasonidos. Estos datos se compararán con los resultados del MOE_D de la cara 1 y 2 obtenidos mediante la propagación de las ondas sonoras.

Figura 16. Resultados de MOE_D por flexión para la propagación del ultrasonido de la cara longitudinal de a/c = 3,25 en GPa

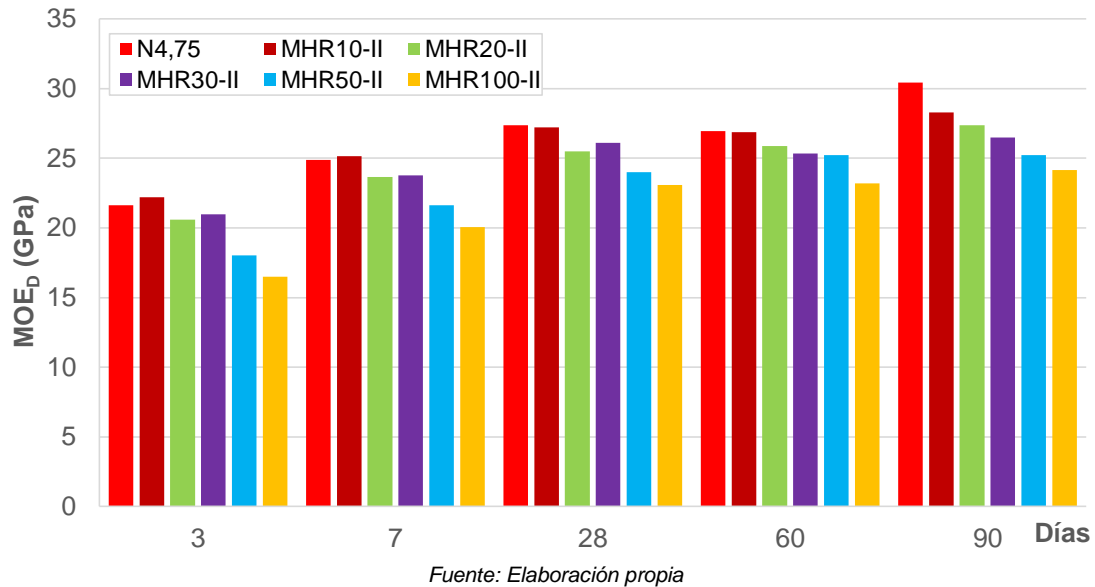


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 16, cuánto más aumenta el porcentaje de AHR menor es el MOE_D ; y además se estabilizan los resultados a los 28 días de curación.

En comparación al N3,25 se percibe que, hasta los 60 días de las muestras con un 50% de AHR o menos, tienen unos valores más elevados que la muestra de referencia y que la única probeta que tiene un valor menor constante es la del 100%.

Figura 17. Resultados de MOE_D por flexión para la propagación del ultrasonido de la cara longitudinal de $a/c = 4,75$ en GPa



En la Figura 17 se observan los mismos comportamientos, pero en este caso los valores tienen un promedio del 15% menos a los 90 días. Al comparar con la referencia N4,75, se aprecia que los MHR-II están por debajo, obteniendo así unos valores MOE_D mejorados.

Con los resultados del MOE_D por ultrasonidos se puede decir que:

- Cuánto más porcentaje de MHR, menor es el MOE_D .
- A los 28 días se consolidan los valores.
- Las probetas MHR-I tienen unos valores superiores a los de su respectiva referencia (N3,25), a excepción de la muestra con el 100% de AHR.
- Las probetas MHR-II, en general, están ligeramente por debajo de su respectiva muestra testigo (N4,75); también son un 15% menores que las MHR-I a los 90 días.

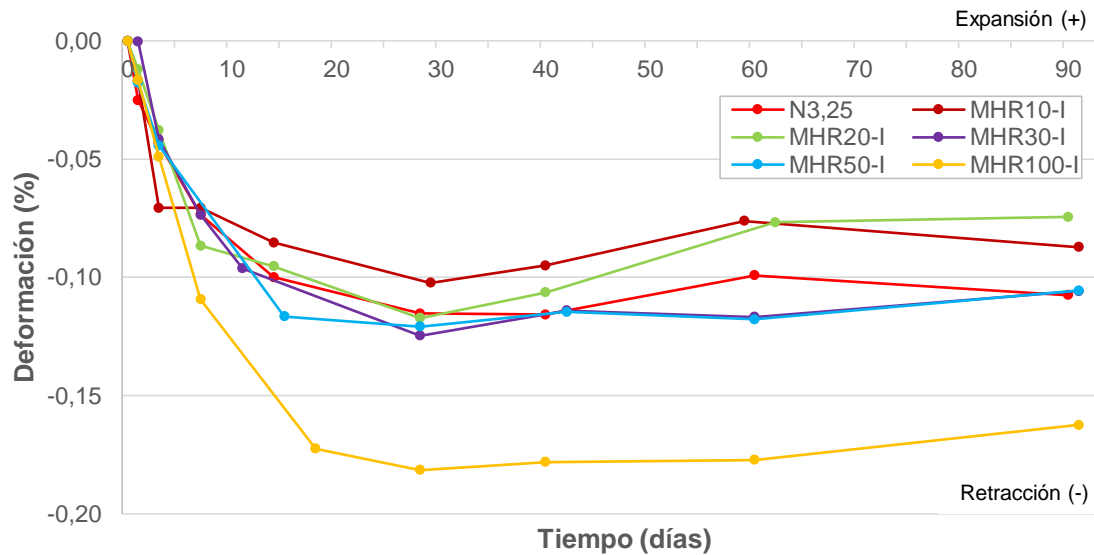
También se pueden analizar los resultados contrastándolos con los de propagación del sonido (ver 3.2.4) de forma general.

- Tienen las mismas tendencias en función el porcentaje de AHR.
- Se estabilizan los valores a los 28 días.
- Las probetas con mejor MOE_D es la que contiene un 100% de AHR y por el contrario las que peor comportamiento tienen son las del 30% o menos. Las primeras son más dúctiles y las otras son frágiles.
- También queda evidenciada la relación entre el MOE_D y la cantidad de aire interior, cuántos menos huecos mejor comportamiento en el MOE_D .

4.2.6 ANÁLISIS DE LA RETRACCIÓN POR SECADO

La retracción por secado se obtiene con la diferencia entre los datos obtenidos de la deformación de las probetas selladas con parafina (retracción básica) y las descubiertas (retracción total) en condiciones ambientales del laboratorio.

Figura 18. Resultados de la retracción por secado de las probetas de relación $a/c = 3,25$

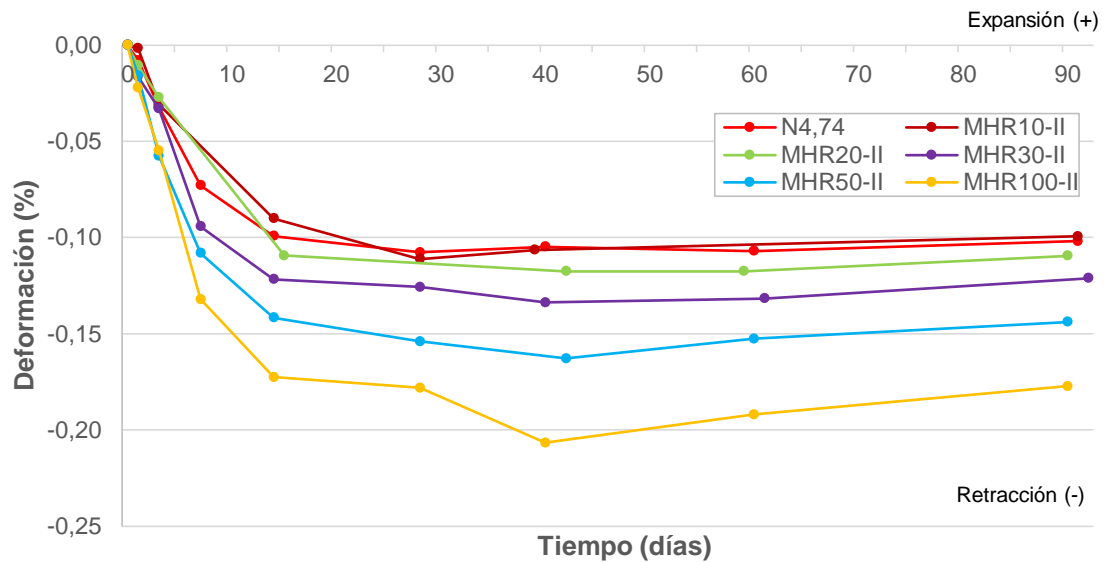


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 18 se puede observar que la probeta que tiene unos resultados poco satisfactorios es la del 100% de AHR. El porcentaje de retracción es mucho más elevada que el resto, siendo así poco apto por los agrietamientos que podría sufrir en elementos con mayores dimensiones. Esto puede ser debido al alto contenido de finos que tiene.

Sorprendentemente las probetas con un 50% de AHR o menos, muestran un porcentaje de retracción muy similar la muestra testigo N3,25 o incluso menor. Las probetas que sufren menos porcentaje de retracción por secado son MHR10-I y MHR20-I, correspondientes a las muestras con menor cantidad de AHR. Mejorando así la retracción de N3,25. También se puede observar que MHR30-I y AHR50-I tienen un comportamiento muy semejante entre ellas.

Figura 19. Resultados de la retracción por secado de las probetas de relación $a/c = 4,75$



Fuente: Elaboración propia

En el caso de las probetas con la relación $a/c = 4,75$, como se muestra en la Figura 19, se ve la influencia de la cantidad de árido. Al tener más árido en la dosificación, también aumenta la cantidad de finos; la diferencia entre las muestras con porcentaje de árido de más del 30% y la muestra testigo se ve más distante. En este caso, no hay probetas con porcentaje de AHR menores que N4,75. Únicamente esta MHR10-I (con el 10% de AHR), que tiene unos resultados muy similares a los de N4,75. Le sigue de cerca MHR20-I, aunque el porcentaje de retracción por secado es ligeramente superior.

En conclusión en la retracción por secado se puede observar que:

- Cuánto más porcentaje de AHR en la dosificación más retracción por secado padecerá.
- Las probetas con un máximo de AHR del 20% tienen una retracción muy similar a la muestra testigo, incluso mejora en los casos donde la relación a/c es menor.
- Las probetas con el 100% de AHR no tienen un buen comportamiento ya que tienen un porcentaje alto reciclado y en consecuencia más cantidad de finos en su constitución.

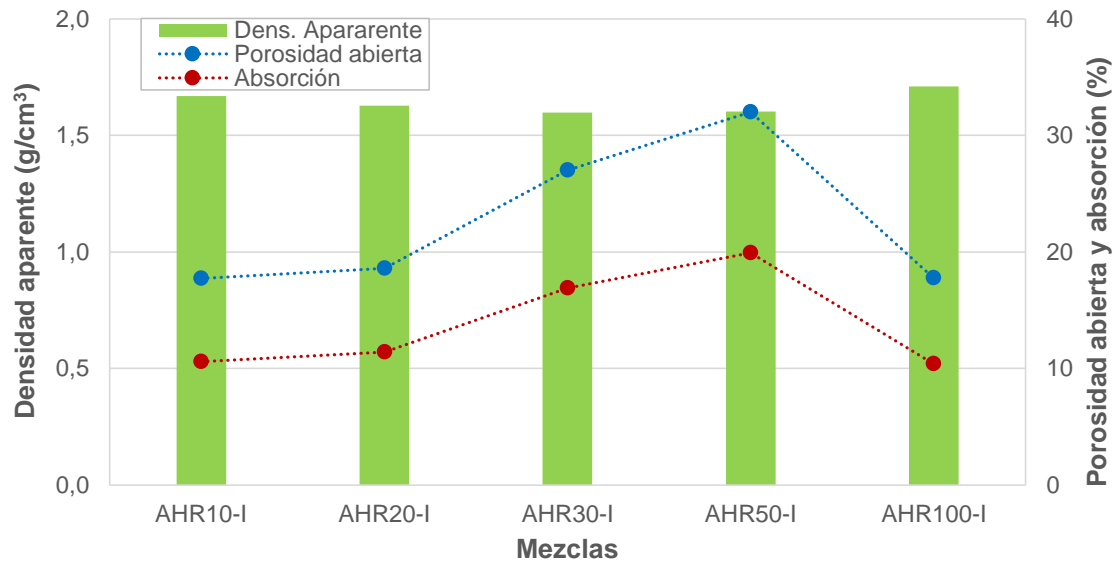
Estos resultados se pueden comparar con la investigación de Neno et al. [8]; con una relación $a/c = 4$ compara la retracción de la probeta testigo (100% AN) y la probeta con un 20% de AHR; el mortero con el 20% tiene un porcentaje de retracción más pronunciado que la de referencia y concluye que este fenómeno está asociado a las partículas finas procedentes del hormigón. Pero en el caso de las probetas de este trabajo, ya sean las MHR-I o las MHR-II, el 20% está por encima de la muestra testigo o tiene una retracción muy parecida.

Otra investigación con la que se pueden comparar resultados es la de Braga et al. [7]; en ella se usa una relación $a/c = 4$. En esta publicación se compara el comportamiento de la probeta de referencia y la del 15% de AHR; esta última tiene la deformación más evidenciada. Este hecho contrasta con el presente trabajo, ya que el MHR20 es uno de los morteros que tienen mejor resultado en el ensayo de la retracción por secado.

4.2.7 ANÁLISIS DE LA DENSIDAD POR ABSORCIÓN. ÍNDICE DE POROSIDAD Y ABSORCIÓN

El ensayo se hace a 28 y 60 días de curación. Los ensayos no se han hecho inmediatamente después de los ensayos a flexión y compresión, así que las edades de curación corresponden a estos ensayos. Con los datos obtenidos durante los ensayos y las fórmulas aportadas por la norma UNE EN 1015-10 [37] se obtienen los datos de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción, como se muestra en las Figuras 18-21. A los 60 días sí que se usan las muestras referencia N3,25 y N4,75.

Figura 20. Resultados de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de las probetas de relación $a/c = 3,25$ a 28 días de curación

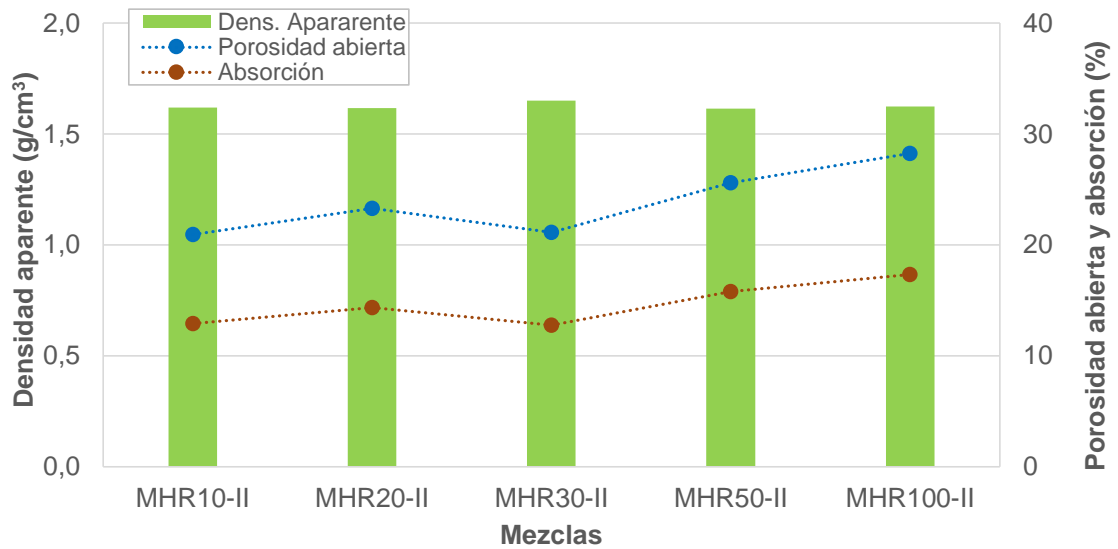


Fuente: Elaboración propia

Las densidades aparentes de las mezclas con relación $a/c = 3,25$ a los 28 días como se aprecia en la Figura 20 son bastante cercana entre ellas, rondan los $1,65 \text{ g/cm}^3$. Del 10 al 50% se puede observar que la densidad tiende a disminuir; pero en cambio en el 100% la densidad es alta con $0,1 \text{ g/cm}^3$ más que el mínimo. La absorción de las muestras se incrementa casi en un 10% en las 4 primeras muestras. No hay mucha diferencia entre el 10 y el 20%, pero sí del 20 al 50% que es donde se produce el mayor incremento. El 100% de AHR se reduce hasta volver al valor inicial de MHR10-I. La porosidad abierta tiene una tendencia similar a la absorción.

A 28 días tienen mejores propiedades las muestras el 10 y el 100%, aunque tengan unas densidades ligeramente mayores al resto, tienen menos poros. Eso implica menos discontinuidades, mejor asentamiento de los materiales en su interior y más compacto.

Figura 21. Resultados de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de las probetas de relación a/c = 4,75 a 28 días de curación



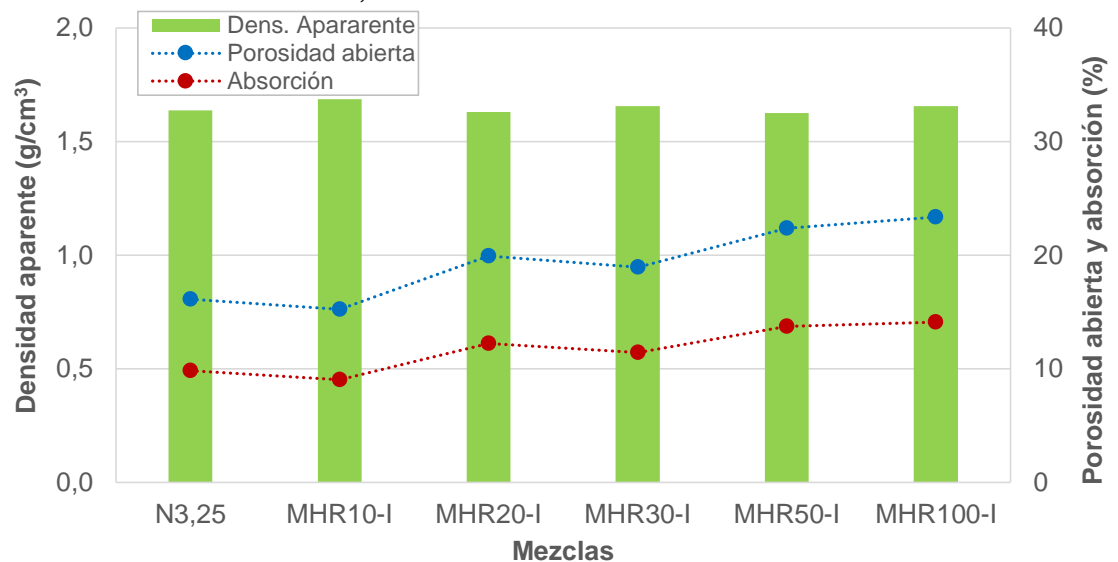
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21 se puede apreciar que las densidades aparentes también rondan los mismos valores, no se puede apreciar una diferencia notable entre ellas. En cuando a la absorción y la porosidad abierta sí que se pueden considerar las variaciones que padecen; tienen una tendencia muy similar, a excepción de la probeta con el 20%, los valores van aumentando según se incrementa el porcentaje de AHR hasta un 7% más para la porosidad abierta y un 4,5% para la absorción.

Si se comparan los resultados a los 28 días se observa que:

- Las densidades aparentes de MHR-I son sutilmente mayores a las MHR-II.
- En MHR-I la porosidad abierta y la absorción aumentan para las probetas con un 50% de AHR o menos, la muestra con el 100% presenta una bajada del 14% y del 9,5% respectivamente.

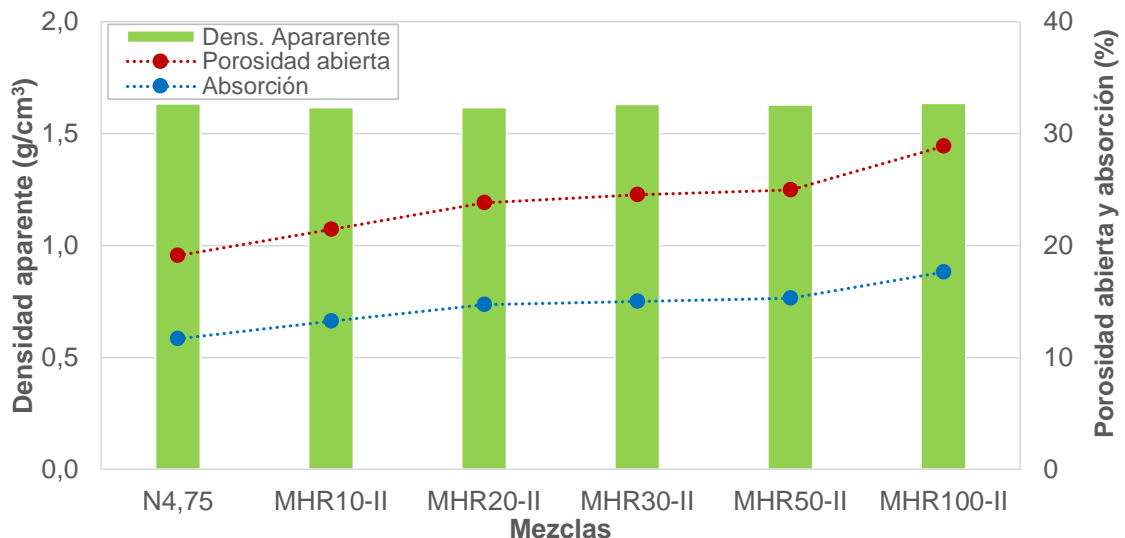
Figura 22. Resultados de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de las probetas de relación a/c = 3,25 a 60 días de curación



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 22 tampoco se observan variaciones con la densidad aparente; siguen rondando los $1,65 \text{ g/cm}^3$. Dónde sí aparecen alteraciones en la porosidad abierta y la absorción; hay una tendencia un tanto notable, a medida que se incrementa el porcentaje de AHR también aumentan estos valores, a excepción de la del 30% que tiene una leve caída de un 1%. Contrastando con los resultados de la probeta de referencia se puede contemplar que con el 10% de AHR hay una disminución de los valores de casi el 1%; mejorando levemente el comportamiento de la probeta testigo.

Figura 23. Resultados de la densidad aparente, porosidad abierta y absorción de las probetas de relación $a/c = 4,75$ a 60 días de curación



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 23 se aprecia el mismo comportamiento en cuanto a la densidad, los valores no tienen variaciones muy perceptibles y éstos rondan los $1,63 \text{ g/cm}^3$. Lo que sí que puede considerar en este gráfico son las alteraciones de la porosidad abierta y la absorción; los valores van aumentando paralelamente según va progresando el porcentaje de sustitución. Los valores de la porosidad van aumentando hasta un 7,5% más entre la probeta con el 10% y la del 100%; y los de la absorción sólo un 4,5%. En comparación con la muestra testigo, todos los valores están por encima, así que ninguna probeta MHR-II mejora el comportamiento de N4,75.

Si se comparan los resultados a los 60 días se observa que:

- Las densidades aparentes de MHR-I ligeramente mayores a las de MHR-II.
- Cuánto más porcentaje de AHR, mayores son los valores de la porosidad abierta y la absorción.
- En comparación con los morteros mismos a los 28 días, las densidades tienen un leve aumento; este fenómeno puede ser el resultado de que las mezclas sean más maduras, ya que los componentes de su interior hayan ido reaccionando.

Las investigaciones de Dapena et al. [10] y de Vegas et al. [11] comprueban la densidad de las probetas a los 28 días; los resultados muestran que la densidad va decreciendo un 33% y un 27%, respectivamente, según se aumenta el porcentaje de AHR (hasta el 50% [10] y el 100% [11]). La explicación de lo sucedido es que la densidad del AHR es inferior al del árido natural que se ha usado en el correspondiente mortero.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

En el siguiente capítulo se expondrán las conclusiones obtenidas con base a la interpretación de los resultados de los ensayos, también se muestra la conclusión personal de la experiencia.

5.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se expondrán las conclusiones respecto a los resultados obtenidos (ver Capítulo IV) según la relación a/c y según la visión general de los morteros con los porcentajes recomendados, según estos resultados.

- **CONCLUSIONES SOBRE LAS RELACIONES A/C**

Como objetivo principal, tal y como se expone en el título del TFG, es evaluar la influencia del efecto de la relación a/c en los morteros con AHR; basándose en este hecho se concluye que las propiedades físicas y mecánicas del mortero se disminuyen y/o se ven más diferenciadas en los morteros con más contenido de árido ($a/c = 4,75$).

Tanto en la resistencia a compresión como en la de flexión a los 90 días de los morteros con relación $a/c = 4,75$ se disminuyen un 45% y un 22,5%, respectivamente, respecto a los morteros de la relación $a/c = 3,25$. Otra propiedad en la cual se reducen las cualidades de los morteros con una relación a/c mayor respecto a la de menor relación es la retracción por secado; las probetas con menos cantidad de árido en el mortero presentan un buen comportamiento llegando a mejorar la probeta de referencia, en cambio las probetas con la relación $a/c = 4,75$ obtienen más porcentaje de deformación sin llegar a mejorar a la probeta testigo. En cuanto a la densidad aparente, no hay mucha variación, así que no se puede concluir ningún comportamiento en especial. Pero para la absorción y la porosidad abierta de los morteros endurecidos, sí que se presentan alteraciones (tanto a los 28 como a los 60 días); la porosidad abierta de la probetas con más cantidad de árido llegan a aumentar un 15% y la absorción un 16% respecto a la relación $a/c = 3,25$.

La única propiedad del mortero que muestra una mejora con la relación $a/c = 4,75$ es el MOE, tanto estático como dinámico. En el MOE del mortero, en ambos casos, con relación $a/c = 4,75$ se reduce un 18% de media en los morteros con menor cantidad de árido en la dosificación. Eso es conveniente ya que con menor MOE menor más dúctil es la probeta.

- **CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LOS MORTEROS**

La conclusión general del mortero según los porcentajes es que los morteros de hasta el 20% de AHR tienen unos resultados semejantes a los del mortero de referencia, llegando a mejorar en algunos aspectos.

En la resistencia a compresión y a flexión de los morteros no han tenido resultados favorables; la resistencia máxima a compresión de los MHR (obtenidos por los porcentajes menores del 20% de AHR) es un 26% menor y para la flexión un 19% menor que el mortero de referencia en ambos casos.

En cuanto al MOE_D , los resultados de los MHR menores al 20% de AHR tampoco muestran mejores comportamientos que, en este caso, el resto de MHR ya que el que mejor resultados proporciona es el 100% de AHR. El MOE_E pasa todo lo contrario, el MHR con el 10% (en el caso de la relación $a/c = 4,75$) es el más dúctil. La retracción por secado de los MHR de hasta el 20% de AHR llega a mejorar el resultado del mortero de referencia en la relación $a/c = 3,25$ y es similar a éste en las muestras de relación $a/c = 4,75$. Y en las propiedades de absorción y porosidad abierta se observan unas diferencias de hasta un 8% –en ambos casos– con el del 100% de AHR, siendo las probetas de hasta el 20% de AHR las que mejores resultados obtienen.

Explicadas las justificaciones de la afirmación en la que se proclaman los morteros con menor o igual porcentaje del 20%, se procede a encontrarle un posible uso dentro del sector de la construcción; a falta de diversos ensayos no realizados, se basará el empleo del mortero en los ensayos elaborados en el presente trabajo. Según la UNE-EN 998-2:2012 [39] el mortero obtenido –indistintamente de la relación a/c o el porcentaje de AHR– es apto para la albañilería ya que las resistencias a compresión a los 28 días son mayores a 10 MPa.

5.2 CONCLUSIONES PERSONALES

Los conceptos sobre los materiales que se adquieren en los primeros cuatrimestres del grado quedan olvidados y dejan paso de otras materias dónde predominan los sistemas constructivos y la realización de proyectos. El desarrollo de este trabajo me ha hecho progresar en los conocimientos que ya había obtenido hace años, esta vez de forma práctica, acabando de entender conceptos que creía conocer pero que hasta ahora no lo hacía. He aprendido así a seguir la metodología que viene detrás de la investigación pero a un nivel más básico.

Como futura Arquitecta Técnica, este trabajo ha servido para darme a entender que la construcción debería ir evolucionando al son de las condiciones que haya en cada momento; y sin la ayuda de las investigaciones esto no sería posible.

BIBLIOGRAFÍA, REFERENCIAS WEB Y TRABAJOS CITADOS

- [1] J. L. Parra y Alfaro, B. Astudillo Matilla, R. Carretón Moreno, J. Castilla Gómez, C. M. Sanabria Zapata, and E. Antuña Bernardo, "Áridos Reciclados Para Hormigones Y Morteros," *Bol. Geol. y Min.*, vol. 117, no. 4, pp. 763–772, 2006.
- [2] C. M. Sanabria Zapata, J.-L. Parra y Alfaro, D. Gaspar-Tebar, and E. Antuña Bernardo, "Fabricación de morteros con árido reciclado," *Ingeopres*, no. 141, pp. 26–28, 2005.
- [3] A. Sales and F. R. de Souza, "Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2362–2370, 2009.
- [4] J. I. Tetre, "Gestión de residuos de construcción y demoliciones. Áridos reciclados," *Tecnol. y Reciclado S.L.*, vol. 59, pp. 86–87, 2007.
- [5] B. Calvo Pérez, J. L. Parra y Alfaro, B. Astudillo Matilla, C. M. Sanabria Zapata, and R. Carretón Moreno, "Áridos Reciclados Para Hormigones Y Morteros. Caracterización Mineralógica y Química," *Bol. Geol. y Min.*, vol. 117, no. 4, pp. 763–772, 2006.
- [6] Asociación española de gestores de residuos de construcción y demolición, "Guía Española De Áridos Reciclados Procedentes De Residuos De Construcción Y Demolición (Rcd)," p. 292, 2011.
- [7] M. Braga, J. De Brito, and R. Veiga, "Incorporation of fine concrete aggregates in mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 960–968, 2012.
- [8] C. Neno, J. De Brito, and R. Veiga, "Using fine recycled concrete aggregate for mortar production," *Mater. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 168–177, 2014.
- [9] J. L. A. Cabrera, F. Urrutia, and D. Lecusay, "Morteros de albañilería con escombros de demolición," vol. 47, no. c, pp. 43–48, 1997.
- [10] E. Dapena, P. Alaejos, a. Lobet, and D. Pérez, "Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 414–422, 2011.
- [11] I. Vegas, I. Azkarate, A. Juarrero, and M. Frías, "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón," *Mater. Construcción*, vol. 59, no. 295, pp. 5–18, 2009.
- [12] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, and W. Xu, "Influence of recycled concrete aggregates on strength on the properties of mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 179–186, 2015.
- [13] S. M. Levy and P. Helene, "Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 11, pp. 1975–1980, 2004.
- [14] A. Hincapié and E. Aguja, "Agregado reciclado," *Univ. EAFIT*, vol. 39, no. 132, pp. 76–89, 2003.

- [15] R. A. Española, "Real Academia Española." [Online]. Available: <http://www.rae.es/>. [Accessed: 27-Nov-2015].
- [16] J. Ramirez i Casas, "Apuntes de la asignatura de Materiales de la Construcción I de la EPSEB." .
- [17] ASTM, "ASTM C144. Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 70, pp. 4–5, 1974.
- [18] ASTM, "ASTM C128-04. Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption," *Annu. B. ASTM Stand.*, no. November, pp. 1–6, 2004.
- [19] ASTM, "ASTM C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 3–7, 2006.
- [20] ASTM, "ASTM C29. Standard Test Method for Bulk Density ('Unit Weight') and Voids in Aggregate," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 04, no. September, p. 4p, 1997.
- [21] Eptisa, "Catálogo de las propiedades del árido reciclado TOT-U RECICLAT." .
- [22] G. Vallderas Cementos Portland, "UNILAND. CEM I 42,5 N/SR." Fábrica Monjos. Barcelona.
- [23] Agbar, "Propiedades del agua de Barcelona. Aigües de Barcelona." Barcelona, p. 2015, 2015.
- [24] ASTM, "ASTM 305. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–3, 2011.
- [25] ASTM, "ASTM C230. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement 1," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 4–9, 2010.
- [26] ASTM, "ASTM C1437-15. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 04.01, 2015.
- [27] ASTM, "ASTM C185-89. Standard Test Method for Air Content of Hidraulic Cement Mortar," *Annu. B. ASTM Stand.*
- [28] ASTM, "ASTM C231. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 04.02, 2014.
- [29] ASTM, "ASTM C109-05. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 04, pp. 1–6, 2000.
- [30] ASTM, "ASTM C349. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–4, 2008.
- [31] ASTM, "ASTM C348. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars1," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 04, pp. 2–7, 1998.

- [32] AENOR, "UNE-EN ISO 12680-1:2007. Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso. (ISO 12680-1:2005)," *Normas UNE*, 2007.
- [33] AENOR, "UNE-EN 12504-4:2006. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.," *Normas UNE*, 2006.
- [34] ASTM, "ASTM C490. Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete 1," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 04, no. January, pp. 1–5, 2001.
- [35] ASTM, "ASTM C596. Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement 1," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 11, no. 5, pp. 11–13, 2010.
- [36] AENOR, "UNE-EN 1015-10:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.," *Normas UNE*, 2000.
- [37] AENOR, "UNE-EN 1015-18:2003. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido," *Normas UNE*, 2003.
- [38] G. V. Vipulanandan, "Electrical resistivity, Pulse Velocity, and compressive properties of carbon fiber-reinforced cement mortar," *J. Mater. Civ. Eng.*, 2008.
- [39] AENOR, "UNE-EN 998-2: 2012. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería," *Normas UNE*, 2012.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a cada persona que me ha apoyado a lo largo de este trabajo y en concreto,

A mis padres, por haber hecho todo lo posible para que pudiera estudiar. Todo esfuerzo se ve recompensado.

A mis hermanos por ayudarme todas las veces que tuve problemas técnicos y por animarme cuando más lo necesitaba.

A Penny, por hacerme compañía en cada momento del trabajo duro y durante todos los años que ha durado el grado.

A la Júlia, que ha sigut com la meva guru i ha estat seguint cada pas que feia.

A ell, company que ha sabut calmar-me en els moments més difícils, sense tu no hagués fet aquest treball.

A tota la gent del laboratori de materials; per l'ajuda, les instal·lacions i les eines que ens heu cedit per fer possible aquest treball.

Y por último pero no menos importante a mis directores del TFG el Dr. José Manuel y Lupita, por la paciencia que habéis tenido conmigo, la ayuda y por encaminarme cuando más perdida estaba. Gracias a José Manuel por ofrecerme hacer este trabajo tan interesante que ha servido como guinda a estos años de estudio de grado. Y gracias a Lupita por los momentos que hemos vivido durante todo el proceso, me llevo una gran amistad de México.



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

GRAU EN ARQUITECTURA TÈCNICA I EDIFICACIÓ ANEXOS

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL EFECTO DE LA RELACIÓN ÁRIDO/CEMENTO EN LOS MORTEROS USANDO HORMIGÓN RECICLADO

Projectista: Jessica Magtibay Abarcar

Director/s: Dr. José Manuel Gómez Soberón

M. C. Fca. Guadalupe Cabrera Covarrubias

Convocatòria: Gener/Febrer 2016

ÍNDICE

ANEXO I	3
I.1 CLASIFICACIÓN DEL MORTERO	5
I.2 GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS	6
I.3 DATOS DE LOS ENSAYOS EN LOS ÁRIDOS	6
I.4 PROPIEDADES DEL ÁRIDO DE HORMIGÓN RECICLADO	7
I.5 COMPOSICIÓN DEL AGUA	12
 ANEXO II	 13
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL MORTERO EN ESTADO FRESCO	15
II.1 CONTENIDO DE AGUA FINAL	15
II.2 DENSIDAD	15
II.3 CONTENIDO DE AIRE	15
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL MORTERO ENDURECIDO	16
II.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN	16
II.5 RESISTENCIA A FLEXIÓN	16
II.6 MÓDULO ELÁSTICO ESTÁTICO	17
II.7 MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO	17
II.8 RETRACCIÓN POR SECADO	19
II.9 DENSIDAD APARENTE. ÍNDICE DE POROSIDAD Y ABSORCIÓN	23

ANEXO I

I.1 CLASIFICACIÓN DEL MORTERO

Clasificación de los morteros		
Según el concepto	Diseñados	
	de Receta o Prescritos	
Según el sitio o el sistema de fabricación	Industriales	En estado seco
		En estado húmedo
	Semi acabados Industriales	Predosificados
		Premezclados de cal y arena
	Preparados <i>in situ</i>	
Según las propiedades o uso	Para Enfoscado y Enlucido	Para uso corriente
		Ligeros
		Coloreados
		Monocapa
		Para renovaciones
		Para aislamiento térmico
	Para Albañilería	Para uso corriente
		Para juntas finas
		Ligeros
	Especiales	Adhesivos para baldosas cerámicas (Cola)
		Revestimientos continuos
		Pasta autonivelantes
		Materiales de rejunta
		Otros
Según el tipo de conglomerante	Yeso	
	Cal	
	Cemento	
	Mixto	

Fuente: Apuntes de Materiales I 2010-11, EPSEB

I.2 GRANULOMETRÍA LOS ÁRIDOS

- ÁRIDO NATURAL

Abertura de malla	% que pasa	Límite Inferior	Límite Superior
4,76	99,77	100	100
2,38	91,00	95	100
1,19	71,37	70	100
0,59	52,50	40	75
0,297	36,30	20	40
0,149	13,17	10	25
0,075	2,90	0	10
Módulo de finura = 2,4			

Fuente: Elaboración propia

- ÁRIDO DE HORMIGÓN RECICLADO

Abertura de malla	% que pasa	Límite Inferior	Límite Superior
4,76	100,00	100	100
2,38	83,08	95	100
1,19	61,28	70	100
0,59	42,96	40	75
0,297	26,38	20	40
0,149	14,66	10	25
0,075	6,16	0	10
0	0,26		
Módulo de finura = 2,7			



Fuente: Elaboración propia

I.3 DATOS DE LOS ENSAYOS EN LOS ÁRIDOS


	Densidad relativa (SSD)	Densidad relativa aparente	Densidad (OD) (kg/m ³)	Densidad (SSD) (kg/m ³)	Densidad aparente (SSD) (kg/m ³)	Absorción (%)
AN	2,63	2,70	2581,64	2623,62	2695,06	1,63
AHR	2,37	2,66	2189,68	2362,62	2648,95	7,90

Fuente: Elaboración propia

I.4 PROPIEDADES DEL ÁRIDO DE HORMIGÓN RECICLADO


		EPTISA C/Montclar, nave 25 Pol. Polizur 08290 - Cerdanyola del Vallès cerdanyola@eptisa.com Tel. 93 594 46 60 Fax. 93 580 57 85	Ver acreditaciones a pie de hoja
TRABAJO:	EP-131055-014	MUESTRA:	IBSS18411
		CLAVE:	110089
Peticionario:	RECICLARIDS, SL B58850181		
Dirección:	Pol. Ind. Pla dels Vinyats II C/ Energia, 2, 08250 Sant Joan de Vilatorrada		
Obra:	Planta de reciclatge a Fonollosa		
Material:	TOT-U RECICLADO MIXTO		
Muestra:	Tomada por EPTISA	Fecha de toma:	01-02-2013
Lugar de toma:	RECEPCIONADA		
Procedencia:	ACOPIO PLANTA		
Uso al que se destina:	SELLO CE		
SUELOS: ENSAYOS SOLICITADOS			
Análisis granulométrico. Caras fracturadas. Desgaste "Los Angeles". Equivalente de arena. Índice de lajas. Resistencia al desgaste (Micro-Deval). Contenido en humus. Contenido total en azufre. Determinación de los sulfatos solubles en ácidos. Determinación de los sulfatos solubles en agua. Contenido en impurezas. Densidad relativa y absorción de áridos finos y gruesos			
Observaciones: Áreas de acreditación: Laboratori d'assaigs amb Declaració Responsable presentada en data 21-05-2010. Inscrit en el Registre General del CTE com LECCE nº CAT-L002			
 V.B.: Josep Mª Torruella Martínez Director de Laboratorio		Cerdanyola, a 11/02/2013	

Está prohibida la reproducción parcial de este informe sin el expreso consentimiento de EPTISA.
 Estos resultados hacen referencia únicamente a la muestra ensayada, de la cual EPTISA, se hace responsable tan solo en el tanto de que haya sido solicitada por sus técnicos.

	EPTISA C/Montclar, nave 25 Pol. Polzur 08290 - Cerdanyola del Vallès cerdanyola@eptisa.com Tel: 93 594 46 60 Fax: 93 580 57 85		Ver acreditaciones en la hoja 1 del informe		
	TRABAJO: EP-131055-014		MUESTRA: IBSS18411		
CLAVE: 110089					
Peticionario: RECICLÀRIDS, SL B58850181 Dirección: Pol. Ind. Pla dels Vinyats II C/ Energia, 2, 08250 Sant Joan de Vilatorrada Obra: Planta de reciclatge a Fonollosa Material: TOT-U RECICLADO MIXTO Muestra: Tomada por EPTISA Lugar de toma: RECEPCIONADA Procedencia: ACOPIO PLANTA Uso al que se destina: SELLO CE					
Fecha de toma: 01-02-2013					
ACTA DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE SUELOS					
ENSAYO	NORMA	RESULTADO			INFORMACIÓN ADICIONAL
Equivalente de arena SE(0.2) /	UNE EN 933-8:2000	57			
Ensayo de los ángeles (%)	UNE EN 1097-2:1999	Fracción granulométrica d/Di (mm)			
Caras de fractura (%)	UNE EN 933-5:1999	37 10/14 2 0 mas Cte (%) Cc (%) Cr (%) Ctr (%) 95 8 92 2 Fracciones granulométricas d/Di (mm) 4/8 8/16 16/32			
Índice de lajas	UNE EN 933-3:1997	Masa (g) Índice lajas (%) Índice agujas 969,3 14			
Análisis granul. tamizado (1)	UNE EN 933-1:1998				
Tamices UNE	50 40 25 20 12,5 8	6,3 4 2 1	0,5 0,25 0,125 0,075		
% que pasa	100,0 98,2 70,9 47,1 33,2 18,4 14,7 10,2				

(1) Ver Gráficos de ensayo en las siguientes hojas del informe

Los fechas de inicio, finalización, así como otros datos relativos a los ensayos incluidos en esta página se encuentran a disposición del cliente en el laboratorio.

	EPTISA C/Montclar, nave 25 Pol. Palizur 08290 - Cerdanyola del Vallès cerdanyola@eptisa.com Tel. 93 594 46 60 Fax. 93 580 57 85	Ver acreditaciones en la hoja 1 del informe
TRABAJO: EP-131055-014	MUESTRA: IBSS18411	CLAVE: 110089

Peticionario: RECICLÀRIDS, SL B58850181

Dirección: Pol. Ind. Pla dels Vinyats II C/ Energia, 2, 08250 Sant Joan de Vilatorrada

Obra: Planta de reciclatge a Fonollosa

Material: TOT-U RECICLADO MIXTO

Muestra: Tomada por EPTISA **Fecha de toma:** 01-02-2013

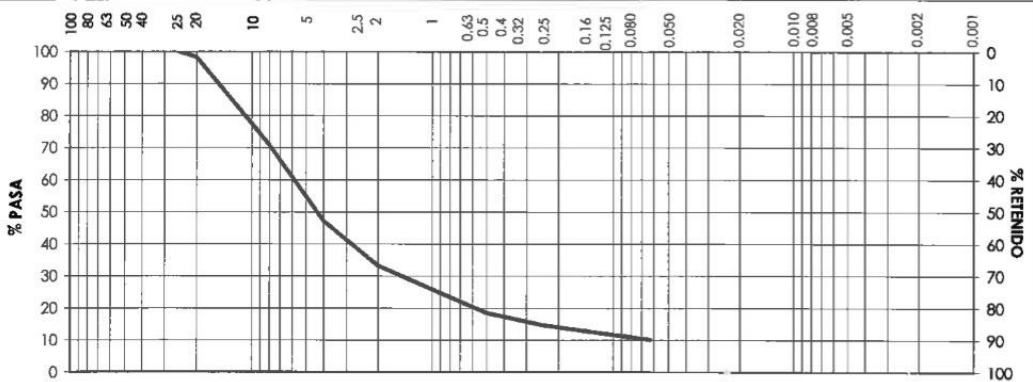
Lugar de toma: RECEPCIONADA

Procedencia: ACOPIO PLANTA

Uso al que se destina: SELLO CE

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS. MÉT. DEL TAMIZADO. (UNE EN 933-1:1998)


Fecha Inicio ensayo: 05-02-2013 **Fecha finalización ensayo:** 06-02-2013




GRUESA	MEDIA	FINA	GRUESA	MEDIA	FINA	GRUESO	MEDIO	FINO	ARCILLA
GRAVA			ARENA			LIMO			

Tamices UNE	50	40	25	20	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,250	0,125	0,063
% que pasa			100,0	98,2		70,9		47,1	33,2		18,4	14,7		10,2

Observaciones:

	EPTISA C/Montclar, nave 25 Pol. Polizur 08290 - Cerdanyola del Vallès cerdanyola@eptisa.com Tel. 93 594 46 60 Fax. 93 580 57 85	Laboratori d'assaigs amb Declaració Responsable presentada en data 21-05-2010. Inscrit en el Registre General del CTE com LECCE nº CAT-L002
TRABAJO: EP-131055-014 MUESTRA: IBSS18411 CLAVE: 110089		
Peticionario: RECICLÀRIDS, SL		
Dirección: Pol. Ind. Pla dels Vinyats II C/ Energia, 2, 08250 Sant Joan de Vilatorrada		
Obra: Planta de reciclatge a Fonollosa		
Material: TOT-U RECICLADO MIXTO		
Muestra: Tomada por EPTISA		Fecha de toma: 01-02-2013
Lugar de toma: RECEPCIONADA		
Procedencia: ACOPIO PLANTA		
Uso al que se destina: SELLO CE		
ACTA DE RESULTADOS DE OTROS ENSAYOS		
ENSAYO	RESULTADO	INF. ADICIONAL
Resistencia al desgaste (Micro-Deval) (UNE EN 1097-1:1996/A1:2003)	% 55,1	
Contenido en humus (UNE EN 1744-1/10)	Negativo	
Contenido total en azufre (UNE EN 1744-1/2010)	% 0,37	
Determinación de los sulfatos solubles en ácidos (UNE EN 1744-1/2010)	% 0,43	

Las fechas de inicio y finalización, así como otros datos relativos a los ensayos incluidos en esta página, se encuentran a disposición del cliente en el laboratorio

		EPTISA C/Montclar, nave 25 Pol. Polzur 08290 - Cerdanyola del Vallès cerdanyola@eptisa.com Tel. 93 594 46 60 Fax. 93 580 57 85	Laboratori d'assaigs amb Declaració Responsable presentada en data 21-05-2010. Inscrit en el Registre General del CTE com LECCE nº CAT-L002																																																
TRABAJO: EP-131055-014		MUESTRA: IBSS-18411	CLAVE: 110089																																																
<p>Peticionario: RECICLARIDS, SL</p> <p>Dirección: Pol. Ind. Pla dels Vinyats II C/ Energia, 2, 08250 Sant Joan de Vilatorrada</p> <p>Obra: Planta de reciclatge a Fonollasa</p> <p>Material: TOT-U RECICLADO MIXTO</p> <p>Muestra: Tomada por EPTISA Fecha de toma: 01-02-2013</p> <p>Lugar de toma: RECEPCIONADA</p> <p>Procedencia: ACOPIO PLANTA</p> <p>Uso al que se destina: SELLO CE</p>																																																			
ACTA DE RESULTADOS DE OTROS ENSAYOS																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ENSAYO</th> <th>RESULTADO</th> <th>INF. ADICIONAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Determinación de los sulfatos solubles en agua (UNE EN 1744-1/99)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">%</td> <td>0,04</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Contenido de impurezas (UNE EN 933-11:2009/AC:2010)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Material flotante (cm³/kg)</td> <td>2,5</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Albañilería hormigón (%)</td> <td>19</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Áridos no tratados - Piedra natural (%)</td> <td>20</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Albañilería de arcilla (%)</td> <td>59</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Materiales bituminosos (%)</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Vidrio (%)</td> <td>0,1</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Otros: arcilla, arena, metales, plástico y yeso (%)</td> <td>0,3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Densidad relativa y absorción de áridos finos y gruesos (UNE EN 1097-6)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Densidad relativa real de árido fino (g/cm³)</td> <td>2,695</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Absorción árido fino (%)</td> <td>12,1</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Densidad relativa real de árido grueso (g/cm³)</td> <td>2,645</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Absorción árido grueso (%)</td> <td>16,3</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				ENSAYO	RESULTADO	INF. ADICIONAL	Determinación de los sulfatos solubles en agua (UNE EN 1744-1/99)			%	0,04		Contenido de impurezas (UNE EN 933-11:2009/AC:2010)			Material flotante (cm ³ /kg)	2,5		Albañilería hormigón (%)	19		Áridos no tratados - Piedra natural (%)	20		Albañilería de arcilla (%)	59		Materiales bituminosos (%)	1		Vidrio (%)	0,1		Otros: arcilla, arena, metales, plástico y yeso (%)	0,3		Densidad relativa y absorción de áridos finos y gruesos (UNE EN 1097-6)			Densidad relativa real de árido fino (g/cm ³)	2,695		Absorción árido fino (%)	12,1		Densidad relativa real de árido grueso (g/cm ³)	2,645		Absorción árido grueso (%)	16,3	
ENSAYO	RESULTADO	INF. ADICIONAL																																																	
Determinación de los sulfatos solubles en agua (UNE EN 1744-1/99)																																																			
%	0,04																																																		
Contenido de impurezas (UNE EN 933-11:2009/AC:2010)																																																			
Material flotante (cm ³ /kg)	2,5																																																		
Albañilería hormigón (%)	19																																																		
Áridos no tratados - Piedra natural (%)	20																																																		
Albañilería de arcilla (%)	59																																																		
Materiales bituminosos (%)	1																																																		
Vidrio (%)	0,1																																																		
Otros: arcilla, arena, metales, plástico y yeso (%)	0,3																																																		
Densidad relativa y absorción de áridos finos y gruesos (UNE EN 1097-6)																																																			
Densidad relativa real de árido fino (g/cm ³)	2,695																																																		
Absorción árido fino (%)	12,1																																																		
Densidad relativa real de árido grueso (g/cm ³)	2,645																																																		
Absorción árido grueso (%)	16,3																																																		

Las fechas de inicio y finalización, así como otros datos relativos a los ensayos incluidos en esta página, se encuentran a disposición del cliente en el laboratorio

Fuente: Eptisa

I.5 COMPOSICIÓN DEL AGUA



AIGUA ABASTAMENT MESCLA

01-01-2014 a 31-12-2014

Component	Unitats	N. det.	Mínim	Mitjana	Màxim
DETERMINACIONS IN SITU					
Temperatura (det. in situ)	°C	43	11,5	17,8	26,1
Temperatura (det. in situ) *	°C	13	12,7	17,0	21,1
PARÀMETRES QUÍMICS					
Fluorurs	mg F/l	56	<0,1	<0,1	0,15
Nitrats	mg NO ₃ /l	56	1,79	5,93	10,60
PARÀMETRES INDICADORS					
<u>Paràmetres indicadors físico-químics i organolèptics</u>					
Olor (25 °C)	Index dil.	56	<1	2	4
Clorurs	mg Cl/l	56	23,40	104,00	231,00
Sulfats	mg SO ₄ /l	56	39,00	74,50	142,00
pH	Unitats pH	56	7,3	7,7	8,0
Conductivitat a 20 °C	µS/cm	56	335	690	1.115
<u>Metalls totals per ICP/AES</u>					
Sodi	mg/l	36	14	55	113
PARÀMETRES FÍSICO-QUÍMICS NO REGULATS					
<u>Metalls totals per ICP/AES</u>					
Calci	mg/l	36	42	67	114
Magnesi	mg/l	36	7,60	14,00	23,00
Potassi	mg/l	36	<5	10	19
Alcalinitat	mg CaCO ₃ /l	56	103,00	151,00	243,00
Duresa total	mg CaCO ₃ /l	56	138,00	234,00	376,00
Bicarbonats	mg HCO ₃ /l	56	126,00	184,00	297,00
METALLS (ICP)					
<u>Metalls totals per ICP-AES</u>					
Calci	mg/l	20	44	72	104
Magnesi	mg/l	20	8,30	17,00	25,00
Potassi	mg/l	20	<5	13	24
Sodi	mg/l	20	14	70	130

Nota : aquí hi ha comptades totes les COMPLETA dels punts de xarxa i dipòsits de distribució dels municipis Barcelona, Esplugues de Llobregat, l'Hospitalet de Llobregat, Sant Adrià de Besòs, Sant Joan Despí i Sant Just Desvern.

ANEXO II

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL MORTERO EN ESTADO FRESCO

II.1 CONTENIDO DE AGUA FINAL

Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en g.

	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
Valores teóricos	297,83	237,07	247,23	257,38	304,10	407,73
Valores finales	410,00	374,51	312,85	354,63	348,77	442,83
Cantidad añadida	112,17	137,43	65,63	97,25	44,67	35,09

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en g.

	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
Valores teóricos	235,01	208,20	210,94	215,16	236,21	275,39
Valores finales	398,00	340,18	336,76	337,34	361,36	382,81
Cantidad añadida	162,99	131,98	125,82	122,18	125,15	107,42

Fuente: Elaboración propia

II.2 DENSIDAD

Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en g/cm³.

	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
Densidad	2,180	2,153	2,143	2,137	2,137	2,120

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en g/cm³.

	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
Densidad	2,154	2,109	2,109	2,107	2,103	2,052

Fuente: Elaboración propia

II.3 CONTENIDO DE AIRE

Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en %.

	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
Contenido de aire	3,7	5,2	4,4	4,3	3,9	3,5

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en %.

	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
Contenido de aire	3,75	5,2	4,6	4,5	3,7	2,9

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL MORTERO ENDURECIDO

II.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en MPa.

Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
3	16,73	15,86	15,55	14,72	13,01	11,84
7	22,11	22,21	21,99	17,53	20,09	15,59
28	29,67	28,62	29,17	26,12	26,49	24,55
60	38,12	30,50	30,75	28,69	27,15	27,45
90	43,61	30,19	32,16	30,01	29,30	30,43

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en MPa.

Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
3	9,44	8,99	7,42	7,31	5,97	5,67
7	13,36	12,50	9,88	11,25	8,89	9,22
28	18,82	15,85	14,73	14,21	12,47	14,40
60	17,80	15,83	15,42	14,75	14,96	16,26
90	22,22	18,54	16,84	16,26	15,30	16,27

Fuente: Elaboración propia

II.5 RESISTENCIA A FLEXIÓN

Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en MPa.

Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
3	5,02	4,60	4,64	4,29	3,74	3,55
7	6,25	5,55	6,21	5,57	5,54	4,94
28	7,94	7,58	7,27	6,95	6,91	7,14
60	9,03	8,75	8,42	7,71	8,03	7,54
90	10,57	7,72	7,87	7,82	7,52	7,57

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en MPa.

Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
3	3,19	2,85	2,35	2,24	1,96	1,73
7	4,15	3,68	3,01	3,66	2,87	2,89
28	5,85	4,95	4,62	4,79	4,06	4,22
60	5,55	5,32	5,09	4,59	4,52	4,52
90	7,47	6,07	5,44	5,53	5,03	4,82

Fuente: Elaboración propia

II.6 MÓDULO ELÁSTICO ESTÁTICO

Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en MPa.

	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
MOE_E	41,11	43,42	38,68	39,49	37,44	41,11

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en MPa.

	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
MOE_E	23,13	35,98	35,00	35,37	33,75	23,13

Fuente: Elaboración propia

II.7 MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO

- POR PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en MPa.

➤ MOE_D flexión cara 1

Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
3	21,59	20,98	19,93	18,48	19,96	15,15
7	27,40	23,55	23,04	22,55	21,25	17,50
28	22,40	26,76	26,47	24,08	23,18	20,92
60	29,75	27,45	26,11	25,84	24,89	21,89
90	25,61	27,14	27,51	26,33	24,00	22,17

Fuente: Elaboración propia

➤ MOE_D flexión cara 2

Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
3	20,21	19,50	19,79	18,37	17,30	15,31
7	24,69	23,26	22,68	22,37	21,04	17,54
28	28,50	26,88	26,29	24,05	23,46	20,92
60	29,40	27,37	26,03	25,51	24,60	21,88
90	26,22	26,76	26,62	25,85	23,76	22,05

Fuente: Elaboración propia

➤ MOE_D cara longitudinal

Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
3	3,88	3,63	3,84	3,79	3,08	2,69
7	4,64	4,14	4,02	3,95	3,80	3,11
28	4,28	4,96	4,68	4,38	4,19	3,89
60	3,86	4,84	4,68	4,64	3,44	3,87
90	3,78	4,85	4,81	4,78	4,17	4,02

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en MPa.

➤ MOE_D flexión cara 1

Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
3	16,94	15,82	13,68	13,81	11,14	8,16
7	21,44	19,16	18,45	17,96	14,88	13,65
28	22,97	21,29	20,34	20,91	20,01	17,24
60	23,42	22,03	21,15	19,94	19,75	19,67
90	25,69	22,20	22,35	20,93	20,15	18,20

Fuente: Elaboración propia

➤ MOE_D flexión cara 2

Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
3	16,93	16,18	17,02	13,58	11,27	8,10
7	20,27	18,55	18,33	18,39	14,99	13,72
28	23,16	21,15	21,93	20,45	19,61	17,14
60	22,96	21,73	21,03	20,40	19,36	17,91
90	25,60	22,41	22,39	21,04	19,51	18,05

Fuente: Elaboración propia

➤ MOE_D cara longitudinal

Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
3	3,86	3,02	2,97	2,63	2,04	1,47
7	3,32	3,49	3,78	3,61	2,67	2,48
28	4,03	3,93	3,58	3,86	3,49	3,09
60	4,14	3,82	3,73	3,56	3,52	3,18
90	4,16	4,06	4,02	3,71	3,59	3,23

Fuente: Elaboración propia

- POR ULTRASONIDOS

Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en MPa.

Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
3	26,97	26,45	26,22	25,09	23,36	21,41
7	30,02	29,94	28,96	28,73	27,43	23,68
28	31,96	32,29	32,41	30,30	29,29	26,67
60	33,13	32,11	31,04	30,54	30,50	27,44
90	29,65	31,87	32,07	31,37	29,48	27,57

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en MPa.

Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
3	21,61	22,19	20,57	20,99	18,02	16,49
7	24,86	25,15	23,67	23,77	21,64	20,05
28	27,37	27,20	25,51	26,10	24,00	23,07
60	26,96	26,86	25,86	25,33	25,21	23,21
90	30,90	28,29	27,37	26,47	25,24	24,16

Fuente: Elaboración propia

II.8 RETRACCIÓN POR SECADO

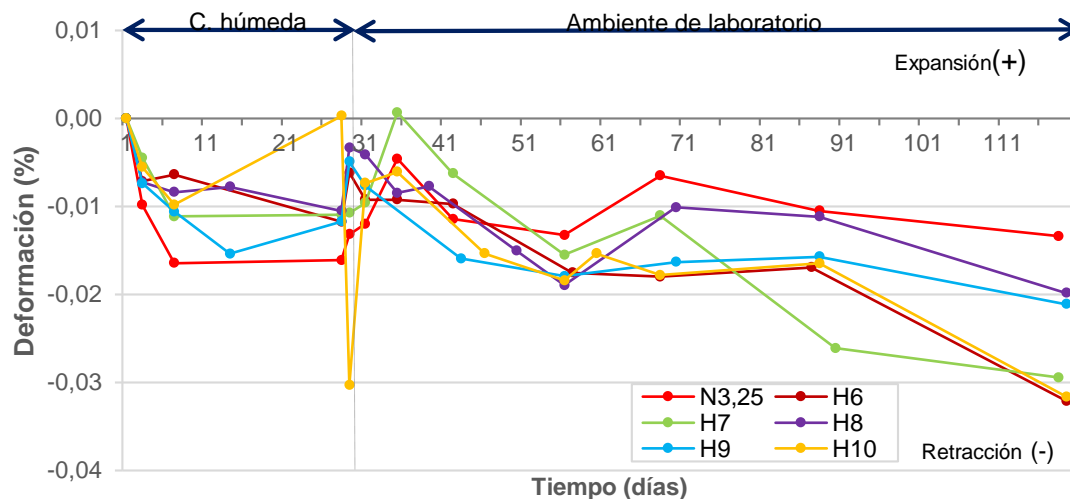
Para mezclas con relación a/c = 3,25; cantidades en %.

➤ Deformación básica

	Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
C. Húmeda	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	3	-0,0099	-0,0072	-0,0045	-0,0073	-0,0074	-0,0056
	7	-0,0165	-0,0064	-0,0112	-0,0084	-0,0106	-0,0098
	14	*1	-0,0060	*1	-0,0078	-0,0154	*1
	28	-0,0161	-0,0118	-0,0110	-0,0105	-0,0117	0,0003
Ambiente del laboratorio	1	-0,0132	-0,0062	-0,0108	-0,0033	-0,0049	-0,0303
	3	-0,0120	-0,0076	-0,0096	-0,0041	-0,0077	-0,0074
	7	-0,0046	-0,0092	0,0007	-0,0085	-0,0159	-0,0061
	14	-0,0115	-0,0097	-0,0063	-0,0077	-0,0179	-0,0154
	28	-0,0133	-0,0176	-0,0155	-0,0151	-0,0163	-0,0184
	40	-0,0065	-0,0180	-0,0111	-0,0190	-0,0157	-0,0154
	60	-0,0105	-0,0169	-0,0261	-0,0101	-0,0211	-0,0178
	90	-0,0134	-0,0321	-0,0295	-0,0112	0,0000	-0,0165

*1 No se tiene el dato

Fuente: Elaboración propia



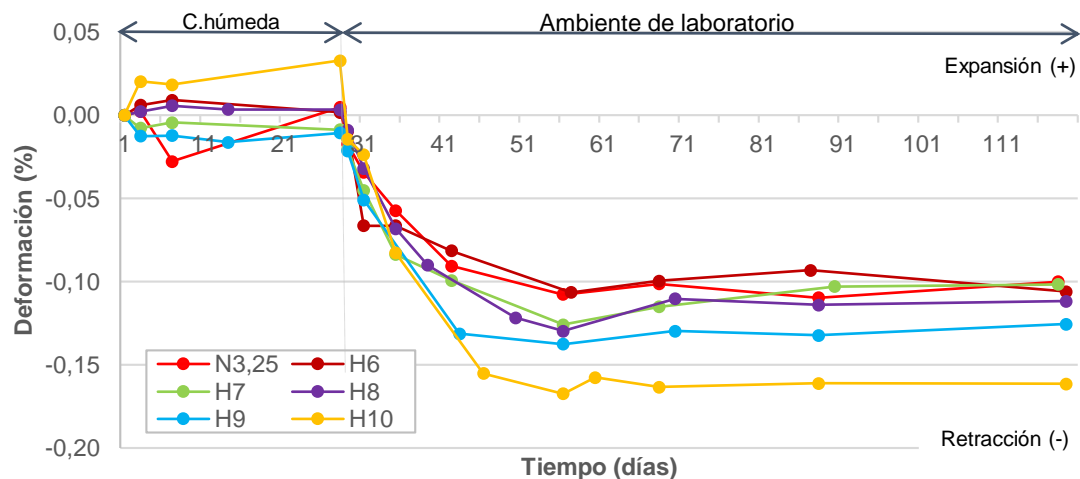
Fuente: Elaboración propia

➤ Deformación total

	Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
C. Húmeda	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	3	0,0024	0,0061	-0,0077	0,0023	-0,0125	0,0204
	7	-0,0277	0,0091	-0,0043	0,0058	-0,0121	0,0184
	14	*1	0,0096	*1	0,0035	-0,0161	0,0329
	28	-0,0161	0,0017	-0,0086	0,0034	-0,0105	-0,0142
Ambiente del laboratorio	1	0,0048	-0,0096	-0,0205	-0,0088	-0,0215	-0,0237
	3	-0,0173	-0,0325	-0,0450	-0,0318	-0,0507	-0,0828
	7	-0,0343	-0,0664	-0,0836	-0,0680	-0,1312	-0,1551
	14	-0,0571	-0,0815	-0,0992	-0,0900	-0,1375	-0,1673
	28	-0,0905	-0,1064	-0,1258	-0,1216	-0,1296	-0,1575
	40	-0,1077	-0,0995	-0,1150	-0,1296	-0,1323	-0,1632
	60	-0,1013	-0,0931	-0,1028	-0,1102	-0,1255	-0,1610
	90	-0,1097	-0,1059	-0,1016	-0,1140	0,0000	-0,1614

*1 No se tiene el dato

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

➤ Retracción por secado

	Días	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
Ambiente del laboratorio	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	1	-0,0251	-0,0170	-0,0121	-0,0003	-0,0178	-0,0165
	3	-0,0432	-0,0707	-0,0378	-0,0416	-0,0443	-0,0490
	7	-0,0735	-0,0852	0,0954	-0,0963	*1	-0,1093
	14	-0,1000	-0,0852	-0,0954	-0,0963	-0,1165	-0,1724
	28	-0,1153	-0,1024	-0,1172	-0,1246	-0,1208	-0,1815
	40	-0,1157	-0,0950	-0,1064	-0,1140	-0,1146	-0,1781
	60	-0,0991	-0,0761	-0,0767	-0,1167	-0,1178	-0,1772
	90	-0,1075	-0,0872	-0,0745	-0,1058	-0,1056	-0,1624

*1 No se tiene el dato

Fuente: Elaboración propia

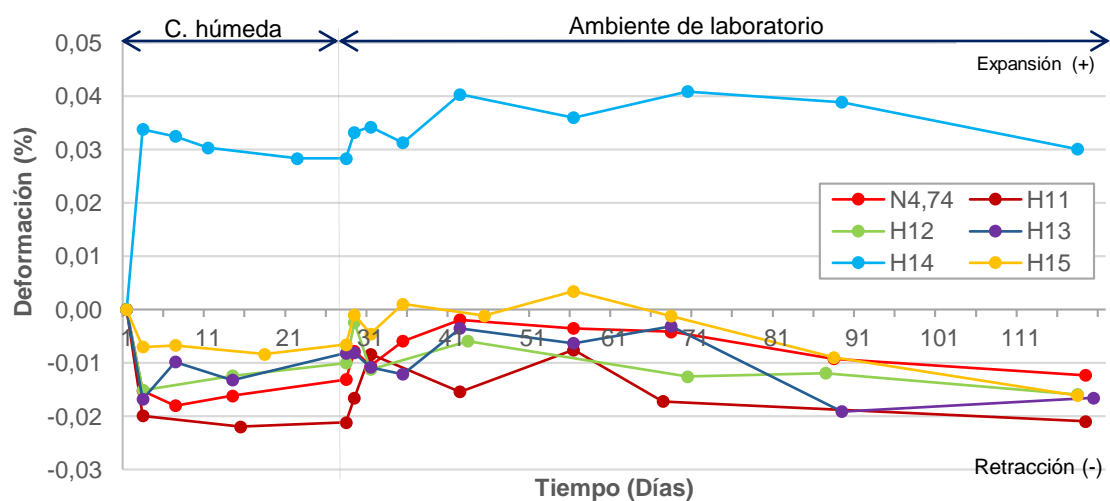
Para mezclas con relación a/c = 4,75; cantidades en %.

➤ Deformación básica

	Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
C. Húmeda	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	3	-0,0152	-0,0199	-0,0151	-0,0168	0,0338	-0,0070
	7	-0,0180	*1	*1	-0,0098	0,0325	-0,0067
	14	-0,0161	-0,0219	-0,0124	-0,0132	0,0304	-0,0083
	28	-0,0131	-0,0211	-0,0100	-0,0081	0,0284	-0,0065
Ambiente del laboratorio	1	-0,0077	-0,0165	-0,0024	-0,0081	0,0332	-0,0009
	3	-0,0105	-0,0083	-0,0112	-0,0108	0,0342	-0,0045
	7	-0,0059	-0,0105	-0,0083	-0,0121	0,0313	0,0011
	14	-0,0019	-0,0154	-0,0059	-0,0035	0,0404	-0,0011
	28	-0,0035	-0,0075	*1	-0,0063	0,0360	0,0035
	40	-0,0041	-0,0172	-0,0125	-0,0031	0,0409	-0,0012
	60	-0,0092	-0,0173	-0,0119	-0,0191	0,0389	-0,0089
	90	-0,0123	-0,0209	-0,0159	-0,0165	0,0301	-0,0161

*1 No se tiene el dato

Fuente: Elaboración propia



➤ Deformación total

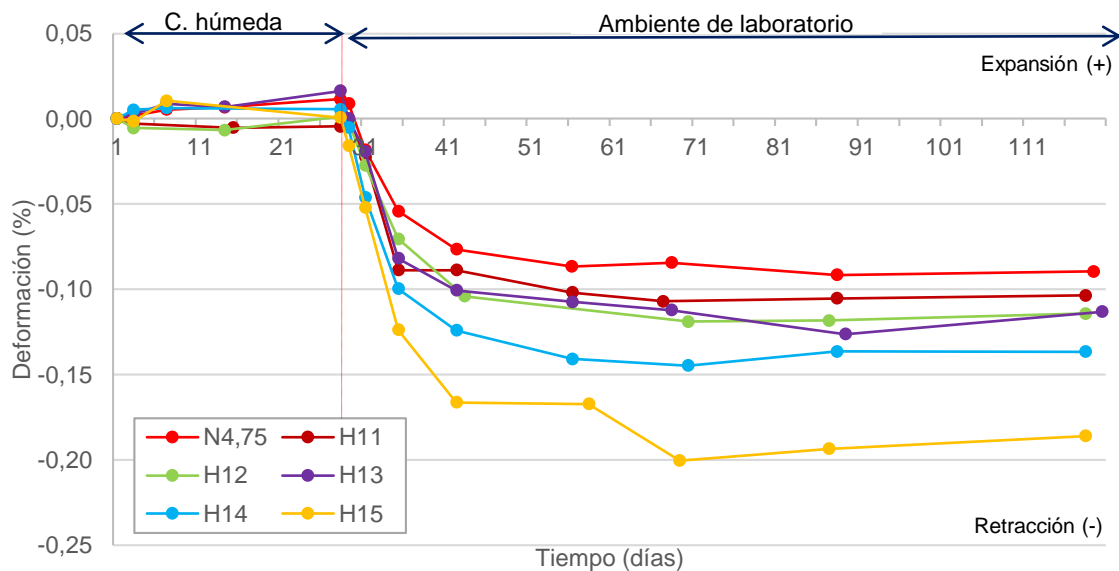
	Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
C. Húmeda	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	3	0,0019	-0,0151	-0,0054	0,0027	0,0052	-0,0015
	7	0,0053	*1	*1	0,0088	0,0063	0,0105
	14	0,0068	-0,0124	-0,0066	0,0070	0,0053	-0,0022
	28	0,0115	-0,0100	0,0011	0,0163	0,0055	0,0007

*1 No se tiene el dato

	Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
Ambiente del laboratorio	1	0,0089	-0,0016	-0,0018	0,0001	-0,0053	-0,0158
	3	-0,0183	-0,0225	-0,0273	-0,0193	-0,0461	-0,0520
	7	-0,0543	-0,0637	-0,0704	-0,0819	-0,0997	-0,1238
	14	-0,0765	-0,0888	-0,1041	-0,1007	-0,1241	-0,1664
	28	-0,0867	-0,1020	*1	-0,1075	-0,1409	-0,1674
	40	-0,0844	-0,1071	-0,1189	-0,1123	-0,1448	-0,2006
	60	-0,0916	-0,1053	-0,1184	-0,1263	-0,1365	-0,1936
	90	-0,0896	-0,1037	-0,1143	-0,1133	-0,1367	-0,1861

*1 No se tiene el dato

Fuente: Elaboración propia



➤ Retracción por secado

	Días	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
Ambiente del laboratorio	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	1	-0,0079	-0,0170	-0,0105	-0,0163	-0,0157	-0,0221
	3	-0,0323	-0,0308	-0,0272	-0,0330	-0,0575	-0,0547
	7	-0,0729	*1	*1	-0,0963	-0,1081	-0,1321
	14	-0,0992	-0,0900	-0,1093	-0,1217	-0,1416	-0,1725
	28	-0,1077	-0,1111	*1	-0,1257	-0,1540	-0,1781
	40	-0,1048	-0,1065	-0,1175	-0,1337	-0,1628	-0,2067
	60	-0,1069	*1	-0,1176	-0,1317	-0,1525	-0,1919
	90	-0,1019	-0,0994	-0,1095	-0,1212	-0,1439	-0,1773

*1 No se tiene el dato

Fuente: Elaboración propia

II.9 DENSIDAD APARENTE. ÍNDICE DE POROSIDAD Y ABSORCIÓN

Para mezclas con relación a/c = 3,25 a los 28 días de curado.

	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
Volumen (cm³)	*1	131,69	126,25	123,00	115,70	125,07
Densidad aparente (g/cm³)	*1	1,67	1,63	1,60	1,60	1,71
Porosidad abierta (%)	*1	17,73	18,62	27,04	32,00	17,79
Absorción (%)	*1	10,60	11,41	16,90	19,91	10,38

*1 No se tiene el dato

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75 a los 28 días de curado.

	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
Volumen (cm³)	*1	129,10	124,97	115,40	127,23	122,29
Densidad aparente (g/cm³)	*1	1,62	1,62	1,65	1,62	1,62
Porosidad abierta (%)	*1	20,96	23,30	21,15	25,59	28,25
Absorción (%)	*1	12,91	14,38	12,79	15,80	17,36

*1 No se tiene el dato

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 3,25 a los 60 días de curado.

	N3,25	MHR10-I	MHR20-I	MHR30-I	MHR50-I	MHR100-I
Volumen (cm³)	132,99	141,07	127,47	127,79	135,08	124,95
Densidad aparente (g/cm³)	1,64	1,69	1,63	1,65	1,62	1,66
Porosidad abierta (%)	16,10	15,23	19,92	18,92	22,37	23,37
Absorción (%)	9,81	9,02	12,21	11,41	13,74	14,08

Fuente: Elaboración propia

Para mezclas con relación a/c = 4,75 a los 60 días de curado.

	N4,75	MHR10-II	MHR20-II	MHR30-II	MHR50-II	MHR100-II
Volumen (cm³)	136,98	126,04	129,97	119,90	123,51	122,70
Densidad aparente (g/cm³)	1,63	1,62	1,62	1,63	1,63	1,64
Porosidad abierta (%)	19,10	21,43	23,82	24,55	24,97	28,89
Absorción (%)	11,66	13,23	14,72	15,03	15,31	17,63

Fuente: Elaboración propia